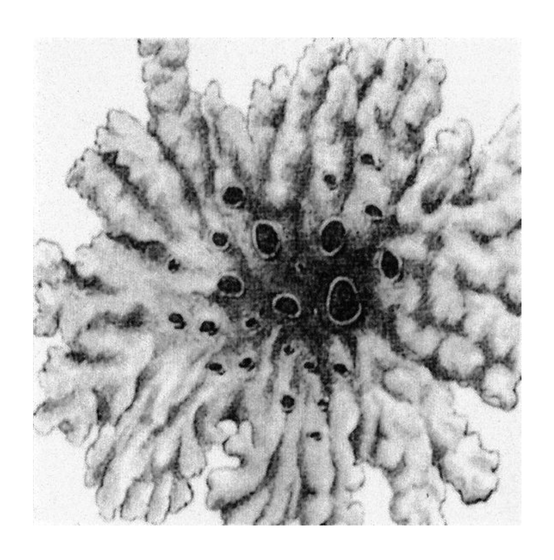
Georg Schön

Pilze



Lebewesen zwischen Pflanze und Tier

Buch

Pilze zählen zu den faszinierendsten Lebewesen unseres Planeten. Weltweit verbreitet, kommen sie in den unterschiedlichsten Lebensformen vor, als mikroskopisch kleine Zelle oder als gigantisches Pilzgeflecht, das kilometerweit den Boden durchzieht. Seit Jahrtausenden weiß der Mensch Pilze für sich zu nutzen, sei es als Grundlage berauschender Getränke, als Nahrungsmittel oder als Arznei. So spielen gerade heute Pilze eine entscheidende Rolle in der Produktion von Medikamenten, aber auch für die Herstellung von Bier, Wein, Schimmelkäse und anderer Nahrungsmittel.

Dieses Buch gibt einen ebenso kompakten wie gut verständlichen Überblick über die eigentümliche Lebenswelt der Pilze, stellt ihre besondere Stellung innerhalb der Nahrungskette beim Abbau von Naturstoffen dar, zeigt ihre Bedeutung bei wichtigen Wechselbeziehungen in Lebensgemeinschaften mit anderen Organismen und erläutert, wie der Mensch bis heute die «magischen Kräfte» der Pilze zu nutzen sucht.

Autor

Professor Doktor *Georg Schön* lehrte zuletzt Mikrobiologie an der Universität Freiburg im Breisgau. Bei C. H. Beck erschien von ihm außerdem: *Bakterien. Die Welt der kleinsten Lebewesen* (1999).

Einleitung

Pilze sind weltweit verbreitete Mikroorganismen, die meist im Untergrund leben. Sie können aus einer mikroskopisch kleinen Zelle bestehen oder ein Pilzgeflecht (Mycel) ausbilden, das in oder auf totem und lebendem Holz wächst, Pflanzen und Tiere befallen sowie den Waldboden über viele Kilometer durchziehen kann. Normalerweise sind die Pilzfäden des Pilzgeflechts nur mikroskopisch zu beobachten. Erst die Fruchtkörper der Höheren Pilze, auch als «Schwammerl» bezeichnet, und das Sporenlager der Schimmelpilze sowie einige parasitische Formen sind auch ohne Lupe für den Laien zu erkennen. Es ist daher verständlich, daß die meisten Menschen nur die Pilz-Fruchtkörper als die eigentlichen Pilze ansehen.

Die meisten Pilzarten zersetzen (wie auch die überwiegende Anzahl der Bakterien) abgestorbene Pflanzen und tote Tiere. Sie spielen somit eine überragende Rolle im biologischen Kohlenstoffkreislauf. Durch ihre Tätigkeit wird verhindert, daß sich das durch die Photosynthese gebildete organische Pflanzenmaterial anhäuft. Beim Abbau der organischen Stoffe werden die mineralischen Nährstoffe wieder freigesetzt, die damit den Pflanzen erneut für ihr Wachstum zur Verfügung stehen, so daß das Leben auf der Erde weitergehen kann und nicht durch organischen Abfall erstickt wird.

Seit Jahrtausenden nutzt der Mensch Pilze – anfangs natürlich unbewußt – zur Herstellung berauschender Getränke und für religiöse Zeremonien, um im Rauschzustand den Göttern näher zu sein. In der Biotechnologie sind Pilze (neben den Bakterien) von größter Bedeutung; es sei hier nur an die Produktion des Antibiotikums Penicillin, ihr Einsatz zur Reifung verschiedener Käsesorten, der Herstellung von Wein, Bier

und vieler asiatischer Lebensmittel erinnert. Auch zur Stärkung und zur Heilung einer Reihe von Erkrankungen werden Pilze seit Jahrhunderten in China und in den letzten Jahren auch in den USA und in Europa immer häufiger verwendet.

Wildpilze lassen sich zu köstlichen Gerichten zubereiten, auf der anderen Seite können sie schwere Krankheiten auslösen oder auch tödliche Vergiftungen verursachen. Bestimmte Schimmelpilze werden zur Verfeinerung von Lebensmitteln genutzt, sie können aber auch auf Lebensmitteln heimtückische Gifte ausscheiden, deren Gefährlichkeit lange unterschätzt wurde. Die meisten Erkrankungen an Kulturpflanzen verursachen Pilze. Bereits in der Bibel werden Hungersnöte erwähnt, bei denen die Vernichtung der Getreideernten durch einen Pilzbefall eine wesentliche Rolle spielte. Ein Pilz war auch für den Ausfall von drei Kartoffelernten in Irland Mitte des 19. Jahrhunderts verantwortlich; als Folge der Hungersnöte und die dadurch bedingte Anfälligkeit für Krankheiten starben etwa 1 Million Menschen. Anderseits sind die meisten Pflanzen für ein gutes Wachstum auf eine Symbiose mit Pilzen angewiesen. Einzigartig ist die Ausbildung einer sehr engen Lebensgemeinschaft von Pilzen mit photosynthetischen Mikroorganismen; diese «Doppelwesen», die Flechten, sind besonders für das Leben an extremen Standorten angepaßt. Viele Tiere benötigen für ihr Wachstum gleichfalls Pilze als Symbionten, um ihre Nahrung verwerten zu können.

«Echte Pilze» sind Organismen, die weder den Tieren noch den Pflanzen zuzurechnen sind, sondern ein eigenes Reich bilden. Ihr vielfältiges Aussehen, von unscheinbaren Einzelzellen bis zu den wunderschönen Formen der Fruchtkörper bei den «Blumenpilzen», ihre verschiedenartige Lebensweise und weltweite Verbreitung sind den meisten Menschen unbekannt. In den folgenden Kapiteln wird daher versucht, die Bedeutung der Pilze sowohl in der Natur als auch für den Menschen sowie ihre

Wechselbeziehungen mit anderen Lebewesen anschaulich zu machen. Es werden dabei hauptsächlich die Echten Pilze behandelt und zum Teil die Niederen Pilze, soweit sie für den Menschen von größerer Bedeutung sind.

1. Ansichten über Pilze in früheren Zeiten und heute

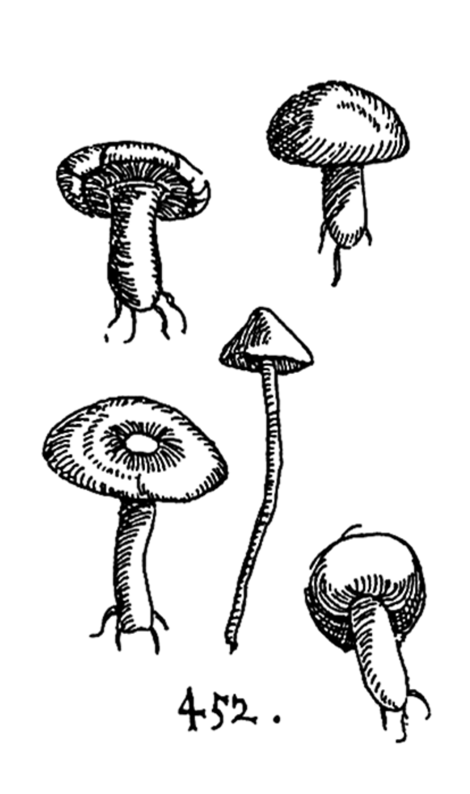
Historische Ansichten

Pilze wurden bereits in der Antike als Organismen angesehen. Nach dem griechischen Gelehrten Theophrast von Eresos (371–287 vor Christus), der von den biologischen Vorstellungen des Aristoteles beeinflußt war, hielt man sie für ungewöhnliche Formen der Pflanzen, da sie im Gegensatz zu den Tieren unbeweglich waren. Die Einteilung der Pilze erfolgte anfangs nach praktischen Gesichtspunkten in giftige und eßbare Arten.

Die bedeutendste wissenschaftliche Literatur über die pharmazeutische Botanik stammt vom griechischen Arzt Pedanios Dioskurides aus dem ersten Jahrhundert nach Christus (um 30–80 nach Christus), in der er die Pilze («Fungi», «Tubera» und «Agaricum») auch als pflanzliche Organismen beschreibt.

Abbildung 1: Ausschnitt aus dem Kräuterbuch von Pedanios Dioskurides (1610)

Schwämme/ Myces, Fungi. Cap. lxxix.



DJe Schwämme / Pfifferling / Griechisch Myces oder Mykitea, zu Latein Fungi genannt / sindt zweyerley Geschlecht / das eine ist zu essen bequeme / das ander aber ein tödtlich Gifft. Die Schwämm wachsen auß vielerley Vrsachen gifftig / denn welche neben verrosten Nägeln oder Eisen / oder neben faulem Tuch / oder neben Schlangen höle oder löchern / oder sonderlich vnder Bäumen / die schädliche Frucht tragen / wachsen / sind alle sampt gifftig / haben auff sich ein zähe feuchte / die etwas Gestalt wie der Rotz / vnnd wenn man sie abbricht vnd liegen lest / so verfaulen sie baldt. Die andere aber / so nicht also gethan / sindt süß vnd bequem zu essen / vnnd wenn man deren zu viel isset / so sindt sie auch schädtlich / denn sie werden schwehrlich im Magen verdäuwet / würgen vnd erstecken den Menschen / oder bringen die Kranckheit / Griechisch Cholera morbus genennt / darvon die Gall mit gewalt vndersich vnd vbersich durchbricht. Darwider hilfft Niter getruncken / oder Lauge mit Essig der gesaltzen ist / oder die Brüh / darinn Saturey oder Wolgemut gesotten hat / oder Hünnermist mit Essig getruncken / oder mit viel Honig vermischt vnnd eingenommen. Die Schwämm ernehren den Leib / werden aber kaum zerlassen / denn sie gehen offt gantz / vnnd wie man sie gessen hat / mit dem Stulgang hindurch.

Für mehr als eineinhalb Jahrtausende blieb «De materia medica» das anerkannte Lehrbuch der Pharmakologie und Pharmazie. In einem Ausschnitt einer freien deutschen Übersetzung von 1610 läßt sich erkennen, daß in diesem Werk die Pilze gleichfalls noch in bekömmliche und giftige Formen unterteilt wurden (Abbildung 1):

Die Schwämme/Pfifferling/griechisch Myces oder Mykitea, zu Latein Fungi genannt, sind zweierlei Geschlecht. Das eine ist zu essen bequem, das andere

aber ein tödlich Gift. Die Schwämme wachsen aus vielerlei Gründen giftig, denn welche neben verrosteten Nägeln oder Eisen oder neben faulem Tuch oder neben Schlangenhöhlen oder -löchern oder besonders unter Bäumen, die schädliche Früchte tragen, wachsen, sind alle miteinander giftig, sie haben auch eine zähe, feuchte Gestalt, etwa wie der Rotz, und wenn man sie abbricht und liegen läßt, so verfaulen sie bald.

Die anderen aber, die nicht so gewachsen sind, sind süß und bequem zu essen, und wenn man von ihnen zu viel ißt, so sind auch sie schädlich, denn sie werden im Magen schlecht verdaut und würgen und ersticken den Menschen oder bringen eine Krankheit, die man griechisch Cholera morbus nennt.

Pilze (oder genauer ihre sichtbaren Fruchtkörper) wurden wohl in der Antike den Lebewesen zugerechnet, die Ansichten über ihre Entstehung waren jedoch sehr spekulativ.

Über die Entstehung von Organismen gab es zwei Hypothesen: 1. Die von alters her vertretene Hypothese der Spontanzeugung (Urzeugung, Abiogenese), nach der kleine Tiere «animalcules» oder Pflanzen aus nichtlebendem Material hervorgehen, und 2. die Hypothese, in der angenommen wurde, daß sich Organismen aus «Samen» oder «Keimen» entwickeln, die immer in der Luft vorhanden sind. Die Doktrin von der Spontanzeugung hatte vom Altertum bis zur Renaissance allgemeine Gültigkeit. So lehrte Aristoteles (384–322 vor Christus), daß Tiere auch aus Erde, Pflanzen oder anderem Nichttierischem abstammen können («Historia animalium»). Erst Francesco Redi (1668) widerlegte eindeutig die spontane Entstehung von Insekten aus unbelebtem Material und wies nach, daß «alles Leben aus dem Ei kommt» («*omne vivum ex ovo*»).

Nach der Erfindung des Mikroskops und der Entdeckung unzähliger Mikroorganismen stellte sich aber immer wieder

die Frage, auf welche Weise diese kleinen Formen entstehen. Die Idee, daß eine geistige Kraft für die Umwandlung von Unbelebtem zu Belebtem bei Mikroorganismen (Bakterien, Pilze) verantwortlich ist, hielt sich noch bis ins 19. Jahrhundert, wobei immer wieder heftiger Streit zwischen den Anhängern und Gegnern der Hypothese von der Urzeugung entbrannte. Man glaubte, daß sich Pilze spontan aus verschiedenen Stoffen entwickeln können. Noch von dieser Doktrin beeinflußt, schrieb der römische Gelehrte Plinius (23/24–79 nach Christus) in seiner «Naturgeschichte» (deutsche Ausgabe 1764) unter anderem, daß Pilze durch Gärung der feuchten Erde oder der Baumwurzeln entstehen. Er nahm an, daß sich erst ein klebriger Schaum, dann eine Art Haut und schließlich der Pilz zeigt.

Im Kräuterbuch von Adamus Lonicerus aus dem Jahre 1679 wird, wie von Plinius angenommen, die Entstehung der Pilze einer Urzeugung zugeschrieben, auch wenn sie als skurrile Pflanzen angesehen werden. In freier Übersetzung heißt es:

> *Die Griechen nennen die Schwämme boletus, die Römer fungos. Es sind weder Kräuter noch Wurzeln, weder Blumen noch Samen, sondern nichts anderes als eine überflüssige Feuchtigkeit des Erdreichs, der Bäume, der Hölzer und anderer fauler Dinge, deshalb leben sie auch nur kurze Zeit, sie wachsen in sieben Tagen und vergehen auch in sieben Tagen. Besonders schnell vermehren sie sich, wenn es donnert.*

Die Doktrin der spontanen Entstehung konnte sich so lange halten, weil man noch keine Kenntnisse über die Fortpflanzung von Pilzen besaß.

Die Ansicht, daß auch die kleinsten Lebewesen nicht durch eine Urzeugung entstehen, sondern aus Samen oder Keimen, wurde erst 1861 nach den Untersuchungen von Louis Pasteur von den meisten Wissenschaftlern jener Zeit

anerkannt. In seinen Versuchen über die Entwicklung von Hefen bei der alkoholischen Gärung (siehe Seite 84) und dem Nachweis, daß sich das Wachstum von Bakterien durch Kochen der Nährlösung unterbinden läßt, war die Hypothese der Urzeugung auch für Mikroorganismen eindeutig widerlegt.

Die heutige Stellung der Pilze im Organismenreich

Die Zuordnung von verschiedenen pilzähnlichen Organismenformen zu den Pilzen ist teilweise noch heute umstritten. Früher wurden Pilze hauptsächlich durch das Fehlen von Eigenschaften charakterisiert, durch die sich Pflanzen und Tiere auszeichnen. Von den photoautotrophen grünen Pflanzen unterscheiden sie sich hauptsächlich dadurch, daß sie organische Substrate als Nahrung benötigen, somit chemoheterotroph sind, da die Zellen kein Blattgrün zur Photosynthese enthalten. In der Regel haben sie einen wenig differenzierten Aufbau (als Lager oder Thallus bezeichnet) und besitzen keinen Sproß und keine Wurzeln. Von den in der Regel zellwandlosen Protozoen und Tieren unterscheiden sie sich durch den Besitz von Zellwänden, zumindest in einem Lebensabschnitt. Die großen Unterschiede in Aussehen und mikroskopischer Struktur in der gesamten Gruppe der Pilze führte schon früher zu einer taxonomischen Unterteilung der Pilze. Es wurde bereits zwischen den «Echten Pilzen» (Eumycota oder Fungi) und der Gruppe der «pilzähnlichen Protisten» (Protoctista), die bewegliche Stadien ausbilden, unterschieden. Außerdem rechnete man früher noch die Schleimpilze (Myxomyceten) zu den Pilzen (im weiteren Sinne). Nach R. H. Whittaker 1969 wurden die «Echten Pilze» in ein eigenes Reich gestellt und die «Niederen Pilze» (pilzähnliche Protisten) in dem Sammelreich der Protista

zusammengefaßt. Über die systematische Einordnung der Echten Pilze und ihre Verwandtschaft mit den übrigen Organismengruppen war man lange Zeit unterschiedlicher Meinung. Erst mit den modernen molekulargenetischen Methoden konnte eindeutig nachgewiesen werden, daß sie keine verwandtschaftlichen Beziehungen zu den Pflanzen haben und ein eigenes Reich bilden. Sie zeigen sogar eine nähere Verwandtschaft zu den Tieren als zu den Pflanzen. In die Abstammungslinie der Echten Pilze werden heute die Flagellatenpilze (Chytridiomyceten), die Jochpilze (Zygomyceten), die Schlauchpilze (Ascomyceten) und die Ständerpilze (Basidiomyceten) eingeordnet; zu den Echten Pilzen gehören auch die Fungi imperfecti (unvollständige Pilze), das sind Vertreter der beiden letzten Gruppen, bei denen noch keine geschlechtliche Fortpflanzung nachgewiesen werden konnte.

Die systematische Gliederung und genaue Ordnung der Pilze ist aber immer noch Gegenstand intensiver Forschung und wird in vielen Bereichen intensiv diskutiert (siehe Kapitel 12).

2. Allgemeine Eigenschaften der Pilze

Pilze leben als Saprobier von toten organischen Stoffen und als Parasiten auf oder in lebenden Organismen. Der Stoffwechsel der Pilze ist im Vergleich zu den vielfältigen Stoffwechselwegen bei den Bakterien sehr einseitig. Trotzdem sind Pilze weltweit verbreitet und überall anzutreffen – vorausgesetzt, es leben gleichzeitig oder es lebten dort vorher andere Organismen. Ein Grund für ihre weltweite Ausbreitung in unterschiedlichsten Biotopen liegt darin, daß sie es verstanden haben, auch organische Abfallstoffe zu nutzen, die von anderen Lebewesen nicht oder nur sehr langsam verwertet werden. Außerdem bilden sie eine Reihe wichtiger symbiontischer Lebensgemeinschaften mit anderen Organismen. Dadurch werden die Bedingungen für ein Wachstum verbessert oder auch Lebensräume (Habitate) erschlossen, die sie allein nicht besiedeln könnten (siehe Kapitel 3 und 4). Die Ausbreitung der meisten Pilze wird auch durch ihre staubfeinen Verbreitungszellen (Sporen oder Konidien) gefördert; es konnte nachgewiesen werden, daß sie sogar mit dem Luftstrom von Afrika bis nach Amerika verfrachtet werden.

Pilze nehmen eine Schlüsselstellung im Haushalt der Natur ein. Sie sind entscheidend an der Zersetzung einer Vielzahl von organischen, besonders pflanzlichen Stoffen in die mineralischen Bestandteile beteiligt (= *Mineralisation*). Der Abbau der Substrate erfolgt vorwiegend im Atmungsstoffwechsel mit Sauerstoff. Es gibt auch einige Formen, die bei Sauerstoffmangel zusätzlich einen Gärungsstoffwechsel besitzen und dabei, wie viele Hefen, besonders Zucker vergären; unter diesen Bedingungen findet aber kein oder nur ein sehr schwaches Wachstum statt. Formen, die keine Atmung besitzen und für die

Sauerstoff sogar giftig ist, scheinen äußerst selten zu sein und wurden bisher nur im Pansen von Wiederkäuern (zum Beispiel Kühen) gefunden (*Neocallimastix*-Arten).

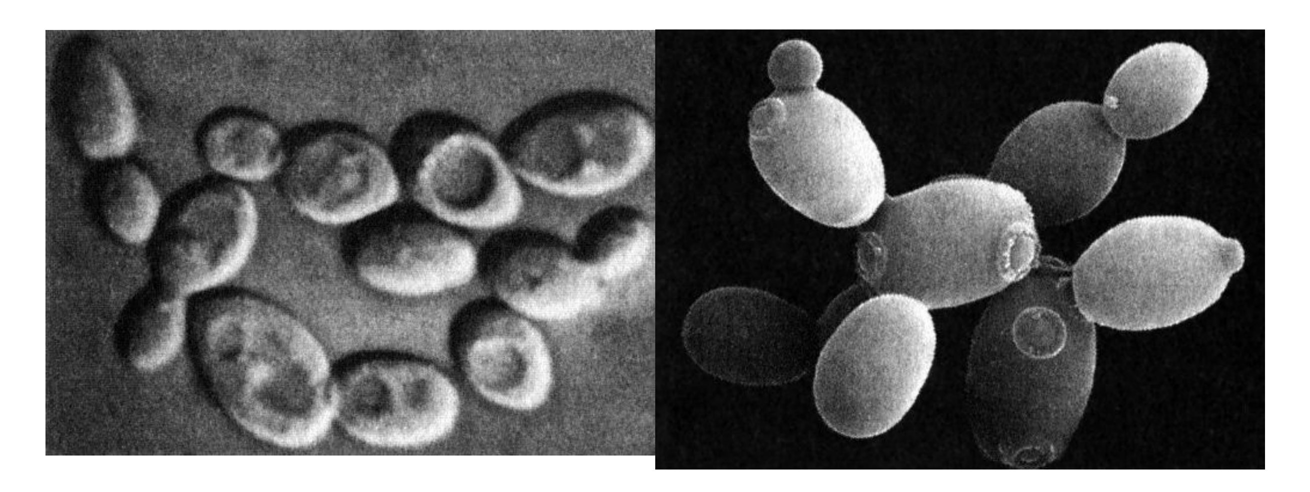
Besonders wichtig für den Kohlenstoffkreislauf in der Natur sind Pilze durch die Zersetzung von komplexen Naturstoffen (Cellulose, Lignin, Proteine, Pektine, Lipide, Keratin und andere Polymere). Die organischen Substrate dienen als Energie- und Kohlenstoffquelle. Pilze leben vor allem (im Gegensatz zu den Algen) auf dem Lande. Dort bevorzugen sie allgemein feuchte Bedingungen, einige kommen aber auch mit geringem Wassergehalt aus, besonders Formen, die als Nahrungsmittelverderber auftreten. Sie lassen sich in warmer (bis circa 60 °C), aber auch in kalter Umgebung (unter −3 °C) nachweisen. Besonders im engen Zusammenleben (Symbiose) mit anderen Organismen können sie unter extremsten Umweltbedingungen leben.

Vor kurzem sind sogar bislang weitgehend unbekannte Pilze unter der Schneedecke der Tundra in Sibirien entdeckt worden; ihren dichtesten Bestand wiesen sie in den späten Wintermonaten auf.

Die Mehrzahl der Pilze lebt unter sauren Bedingungen (pH 6,5–3,5), zum Beispiel in sauren Waldböden und Äckern.

Es sind circa 120 000 Pilze bekannt, davon sind bisher etwa 70 000 identifiziert und benannt worden; man schätzt aber, daß mindestens 250 000–300 000 Arten (etwa so viele wie Samenpflanzen) Vorkommen. Andere Autoren vermuten, daß sogar über eine Million verschiedene Arten auf der Erde leben.

Abbildung 2: Mikroskopische Aufnahmen von sprossenden Hefezellen, links in Differential-Interferenzkontrastmikroskopie-Technlk (DIK-Verfahren), rechts im Rasterelektronenmikroskop



Pilze sind in Gestalt und Entwicklung außerordentlich mannigfaltig. Echte Pilze können in der vegetativen Phase nur aus einer Zelle bestehen oder verzweigte Plasmafäden mit blasenförmigen Erweiterungen bilden; außerdem findet man, beispielsweise bei den Hefen, sprossende Zellen (Durchmesser etwa 5–10 µm, Abbildung 2).

Abbildung 3: a) Ungegliederte und
b) durch Querwände (=S) gegliederte Pilzhyphe

Der überwiegende Teil der Pilze besteht aber aus langen ungegliederten oder durch Querwände gegliederten Pilzfäden (= Hyphen, Durchmesser etwa 3–8 µm, Abbildung 3). Diese Pilzfäden können ein verzweigtes Hyphengeflecht, das Mycel, bilden. Unter bestimmten Bedingungen, etwa bei der Fruchtkörperbildung der Ständer- und Schlauchpilze (siehe unten), lagern sich die Hyphen zusammen und verflechten sich zu gewebeartigen Thalli. Es handelt sich aber dabei um keine echten Gewebe, wie sie bei Tieren und Pflanzen Vorkommen.

Viele Hefepilze können unter bestimmten Umweltbedingungen auch ein fädiges Wachstum aufweisen, zum Beispiel *Candida*. Diese septierten Zellfäden (= Pseudohyphen) entsprechen jedoch in ihrer Entwicklung nicht den Hyphen der echten fädigen Pilze.

Bei den früher als pilzliche Protisten oder als «Niedere Pilze» bezeichneten Organismen, die keine verwandtschaftlichen Beziehungen zu den Echten Pilzen haben, findet man neben ungegliederten Fäden mit einer Zellwand (wie bei den Falschen Mehltaupilzen) im Entwicklungszyklus auch zellwandlose Zellen. Die Echten Schleimpilze, die keine Verwandtschaft zu den Echten Pilzen aufweisen und in eine eigene Abstammungslinie gestellt werden, wachsen in ihrem Entwicklungszyklus zu beweglichen, zellwandlosen Zellmassen (= Plasmodium, Fusionsplasmodium) aus; es sind Riesenzellen mit hunderten Zellkernen, die sich als schleimige Masse amöboid über feuchten Untergrund bewegen und dabei andere Mikroorganismen (zum Beispiel Bakterien, Algen, Pilzhyphen, Protozoen) in sich aufnehmen. Unter bestimmten Umweltbedingungen entwickeln sie sich zu sporenbildenden Fruchtkörpern mit Zellwänden. Auffällig sind zum Beispiel die hellgelben, handteller- bis etwa 2 Quadratmeter großen Schleimmassen von *Fuligo septica* («Hexenbutter, Gerberlohe»), die bis zu 1 Zentimeter pro Stunde über Moos oder Boden kriechen können.

Im Gegensatz zu den Schleimpilzen, die ein echtes Plasmodium bilden, besteht die vegetative Phase der Zellulären Schleimpilze aus einer Anhäufung tausender einkerniger Zellen (= Pseudoplasmodium, Aggregationsplasmodium).

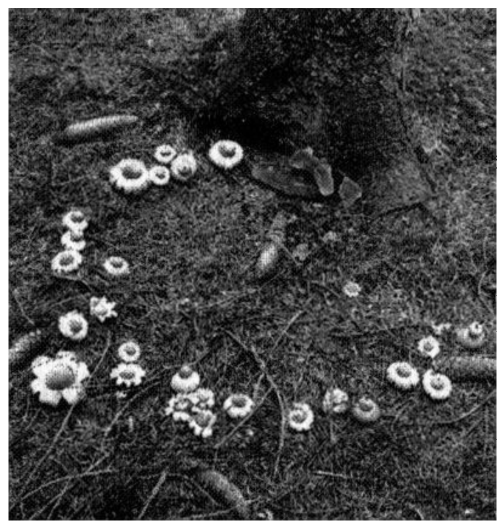
Zellwandlose Formen beobachtet man auch im Entwicklungszyklus einiger parasitischer Pilz-Arten.

Die Zellen der meisten Echten Pilze sind mit einer Zellwand aus Chitin umgeben, der gleichen Substanz, aus der auch die Körperhülle der Insekten aufgebaut ist. Cellulose, die

Zellwandsubstanz der Pflanzen, fehlt dagegen bei allen Echten Pilzen, kommt aber bei den Echten Schleimpilzen und einigen pilzähnlichen Protisten (zum Beispiel Eipilze = Oomyceten) vor.

Viele Pilze wachsen unauffällig und sind, wie die Hefen, nur mikroskopisch sichtbar (Größe wenige hundertstel Millimeter); wenn sie aber in hoher Anzahl in flüssiger Kultur vorliegen, lassen sie sich (wie bei unfiltriertem Weizenbier) durch eine Trübung erkennen. Die meisten unserer Wald-, Wiesen- und Holzpilze bilden aus dem meist unsichtbaren, den Boden oder Holz durchziehenden Mycel, gut sichtbare Fruchtkörper. Viele Menschen halten daher allein die Fruchtkörper für die «Pilze», ohne zu bedenken, daß der Hauptteil der Pilze aus dem verborgenen Mycel besteht. Dieser falschen Ansicht war auch schon der bedeutende Pilzkenner Pier A. Micheli (1679–1737), der die Entwicklung eines Fruchtkörpers aus einer Spore bereits 1729 darstellte, die Pilzfäden aber übersehen oder nicht erkannt hatte.

Die einzelnen Hyphen des Mycels, von denen die Fruchtkörper entstehen, sind meist mikroskopisch dünn, können sich aber zu dicken, wurzelähnlichen Strängen zusammenlagern oder eine kaum glaubhafte Länge erreichen: Im US-Staat Washington wurde ein Exemplar des an Baumwurzeln parasitierenden Hallimasch-Pilzes (*Armillaria ostoyae*) gefunden (1992), dessen Ausdehnung nach ersten Messungen und Berechnungen über 600 Hektar beträgt. Eine noch größere Ausbreitung des Mycels wurde bei einem anderen Hallimasch nachgewiesen, der im US-Bundesstaat Oregon entdeckt wurde (2000). Sein Mycel reicht etwa 90 Zentimeter tief in die Erde und breitet sich über circa 880 Hektar aus, das ist etwa die vierfache Ausdehnung von Helgoland. Die kaum vorstellbare Ausbreitung des Mycels im Erdboden spricht für ein Alter dieses Pilzes von etwa 2400 Jahren. Die Gattung Hallimasch (*Armillaria*) umfaßt demnach Lebewesen, die beispielsweise die Masse eines Blauwals deutlich übertreffen.



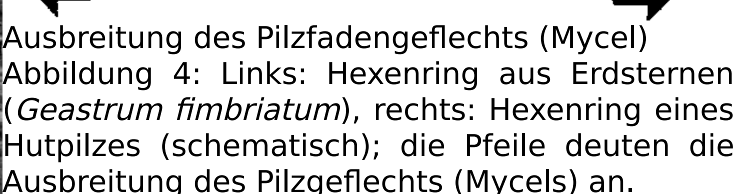


Abbildung 4: Links: Hexenring aus Erdsternen (*Geastrum fimbriatum*), rechts: Hexenring eines Hutpilzes (schematisch); die Pfeile deuten die Ausbreitung des Pilzgeflechts (Mycels) an.

Auf Wiesen und in Wäldern kann oft eine kreisförmige Wachstumszone von Fruchtkörpern beobachtet werden (Abbildung 4). Bevor das Pilzmycel als Teil des pilzlichen Organismus erkannt war, rankten sich um das unerklärbare Hervorsprießen von Fruchtkörpern in Ringen verschiedene Legenden.

Im Mittelalter wurden diese sogenannten «Hexenringe» mit Kröten und Hexen, aber auch mit Elfen in Verbindung gebracht.

Es wurde beispielsweise angenommen, daß die Pilzringe in der Walpurgisnacht wachsen, wenn die Hexen sich versammeln oder Elfen ihre Tänze aufführen. Die einfache biologische Erklärung ist aber, daß sich das unterirdische Mycel verschiedener Ständerpilze von einer Stelle (etwa im Rasen) ungestört strahlenförmig im Boden ausbreitet und von seiner jüngsten, wachsenden Randzone die Fruchtkörper an die Oberfläche herauswachsen. In der inneren Zone stirbt der Pilz meist aus einem Nährstoffmangel ab. Die Hexenringe können einen Durchmesser von einem Meter, aber auch von mehreren bis über 100 Metern erreichen.

Im Unterschied zu den höheren Organismen gibt es bei Pilzen vielfältige Formen der Sexualität: sie reicht von der Verschmelzung gleich aussehender, aber geschlechtlich

unterschiedlicher Fortpflanzungszellen (Isogamie) bis zur Aufnahme eines geschlechtlich unterschiedlichen Kernes aus einer vegetativen, zweikernigen Hyphen-Zelle durch einen anderen Zellfaden mit einkernigen Zellen (Somatogamie).

Da man bei den meisten Pilzen keine männlichen und weiblichen Fortpflanzungszellen unterscheiden kann, werden diese sexuellen Sporen mit + und − oder a und b bezeichnet.

Diese sexuelle Fortpflanzung wird auch Teleomorph, Hauptfruchtform oder perfektes Stadium genannt. Außerdem können sich Pilze sehr erfolgreich ungeschlechtlich mit asexuell entstehenden Sporen, den Konidien, vermehren. Diese Form der Vermehrung nennt man asexuelle Fruktifikation, Anamorph oder Nebenfruchtform.

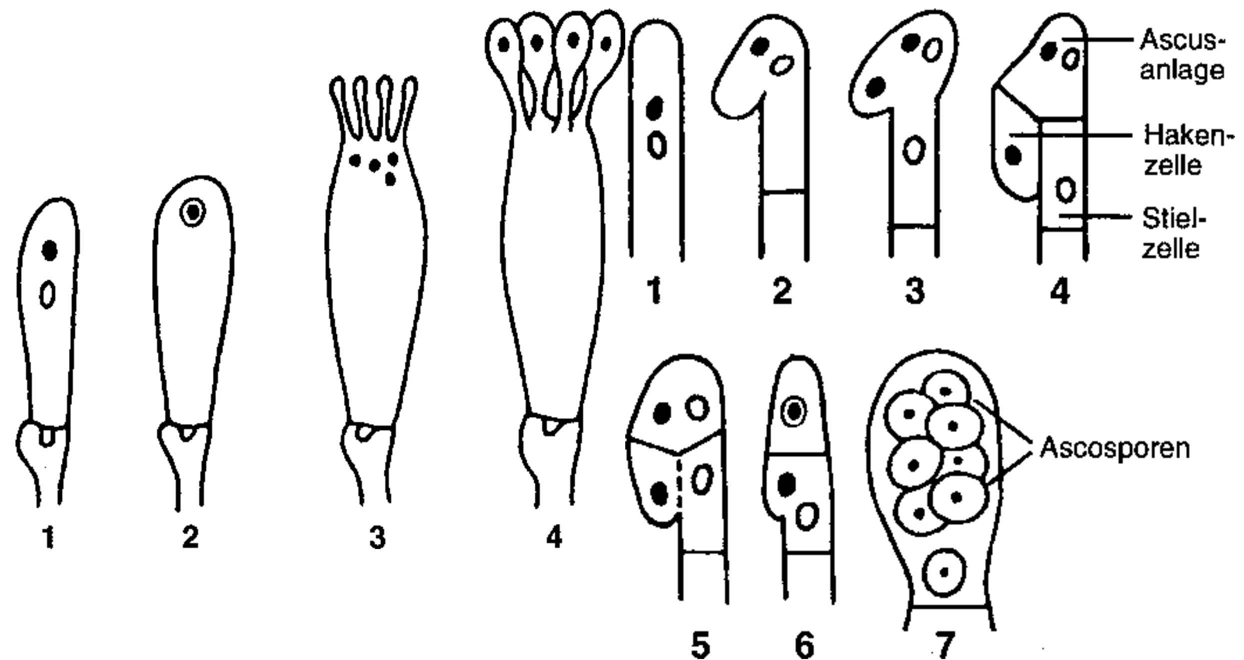
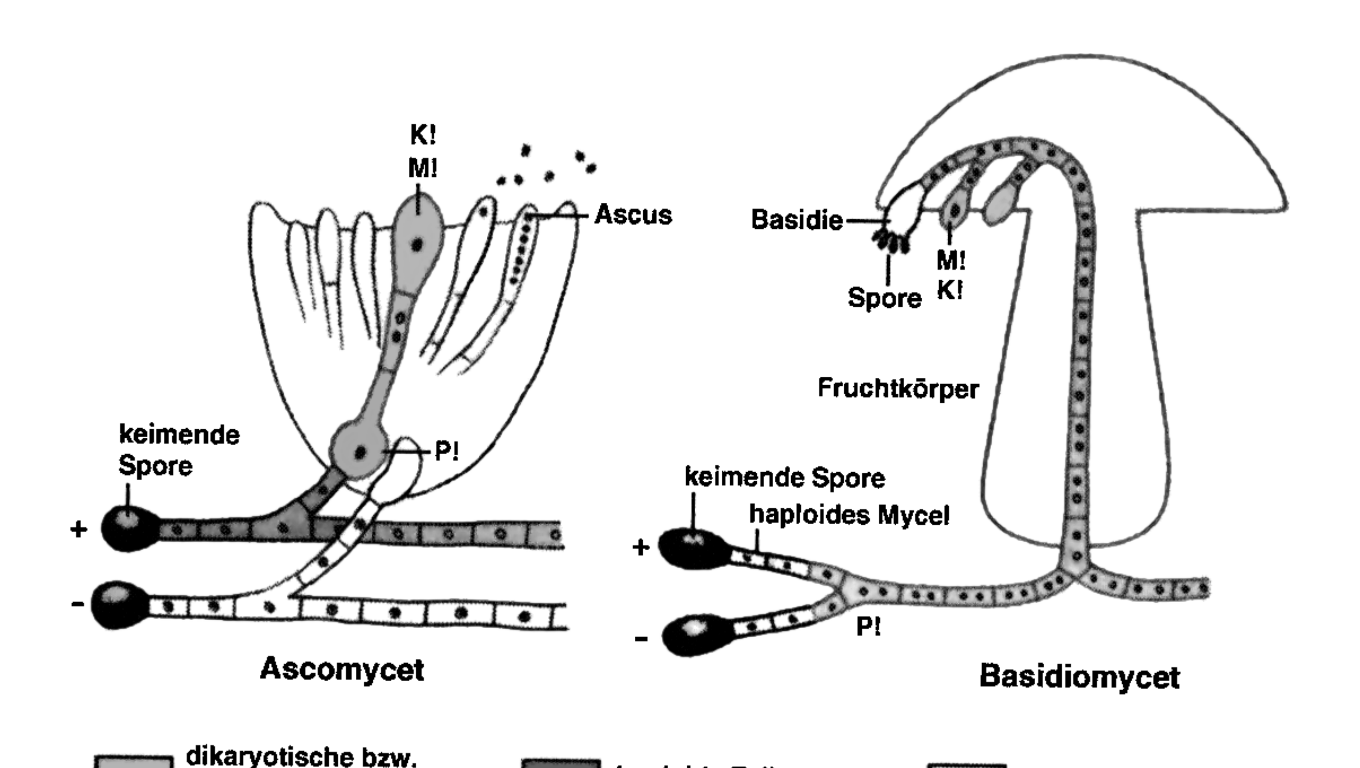


Abbildung 5: a) Eine Form der Basidiosporenbildung bei Ständerpilzen: Die beiden Kerne in der Endzelle der basidienbildenden Hyphe (1) verschmelzen zu einem diploiden Kern (2). In dieser nun als Basidie bezeichneten Zelle findet anschließend eine Reduktionsteilung (Meiose) statt, durch die vier haploide Kerne entstehen (3). Am Scheitel der Basidie bilden sich vier Auswüchse (Sterigmen), in die die Kerne einwandern (4). In diesen Sporensäckchen differenzieren sich die Sporen und werden nach der Reifung abgeschnürt.

b) Ascusbildung bei den Schlauchpilzen: Im typischen Fall krümmt sich eine zweikernige Endzelle (1) mit der Spitze nach rückwärts (2), so daß für den zweiten Kern ein eigener Zellraum entsteht. Nach gleichzeitiger Kernteilung (Mitose) (3) werden die jeweiligen Tochterkerne durch Zellwände abgetrennt (4). Die Hakenzelle vereinigt sich wieder mit der Stielzelle zu einer zweikernigen Zelle (5). In der Spitzenzelle, dem Ascus, findet erst die Kernverschmelzung statt (6) und dann die Reduktionsteilung (Meiose) zu vier haploiden Kernen, aus denen sich die Ascosporen entwickeln (7), die nach der Reifung freigesetzt werden.

In der sexuellen Entwicklung gibt es Stadien, die in den Zellen nur den einfachen Chromosomensatz (die Hälfte der genetischen Information) enthalten (=Haplophase) oder den doppelten Chromosomensatz in einem Kern besitzen (=Diplophase); als Besonderheit findet man bei Schlauch- und Ständerpilzen auch Hyphen mit zwei geschlechtlich unterschiedlichen, haploiden Kernen, eine Dikaryophase (Zweikernphase). Aus diesen dikaryotischen Hyphen entwickeln sich bei den Schlauch- und Ständerpilzen die Fruchtkörperanlagen. Die Bezeichnung Schlauch- beziehungsweise Ständerpilze bezieht sich auf die Form ihrer Sporenbehälter (= Sporangien). Bei den Schlauchpilzen findet die Verschmelzung der beiden Kerne und die anschließende Reduktionsteilung zu den haploiden Sporen innerhalb einer großen schlauchförmigen Zelle statt (Abbildung 5). Bei den Ständerpilzen dagegen wandern nach der Reduktionsteilung die vier Kerne in Auswüchse des Sporangiums, wo sich die Sporen ausbilden. Auch die Bildung der Fruchtkörper verläuft bei den beiden Pilz-Gruppen unterschiedlich.

Abbildung 6: Entwicklung der Pilze: Die meisten Schlauch- und Ständerpilze besitzen einen Generationswechsel. Aus den Pilzsporen entwickelt sich eine haploide Generation (haploides Mycel), und nach der Verschmelzung der Geschlechtszellen oder Organe schließt sich eine zweikernige Generation an, da auf die Zellverschmelzung (P!) nicht unmittelbar eine Verschmelzung der haploiden Kerne erfolgt. Die beiden geschlechtlich unterschiedlichen Kerne liegen paarweise in den Zellen (Paarkernstadium, Dikaryophase). Bei der Zellteilung teilen sich die Kerne gleichzeitig, so daß die neu gebildeten Zellen gleichfalls ein Kernpaar enthalten. Erst in den sporenbildenden Zellen (Ascus, Basidie) findet die Kernverschmelzung (K!) statt, unmittelbar darauf erfolgen die



Reduktionsteilung (M! = Meiose) und die Abgliederung der haploiden Asco- beziehungsweise Basidiosporen (siehe Abbildung 5). Während die zweikernigen Hyphen der Schlauchpilze von den einkernigen Hyphen ernährt werden und für die Fruchtkörperbildung jeweils ein neues Paarkernmycel entstehen muß, sind die zweikernigen Hyphen bei den Ständerpilzen in der Ernährung selbständig und können jahrelang weiterwachsen und neue Fruchtkörper ausbilden.

Bei Schlauchpilzen werden die dikaryotischen Hyphen jedes Jahr neu aus der Verschmelzung von haploiden Stadien gebildet, während bei den Ständerpilzen, nach einer Verschmelzung von haploiden Hyphen, die entstandenen dikaryotischen Hyphen jahrelang weiterwachsen und immer wieder (bei geeigneten Umweltbedingungen) neue Fruchtkörper bilden können (Abbildung 6).

Abbildung 7: Pilzblume: Asiatische Schleierdame (*Dictyophora indusiata*)

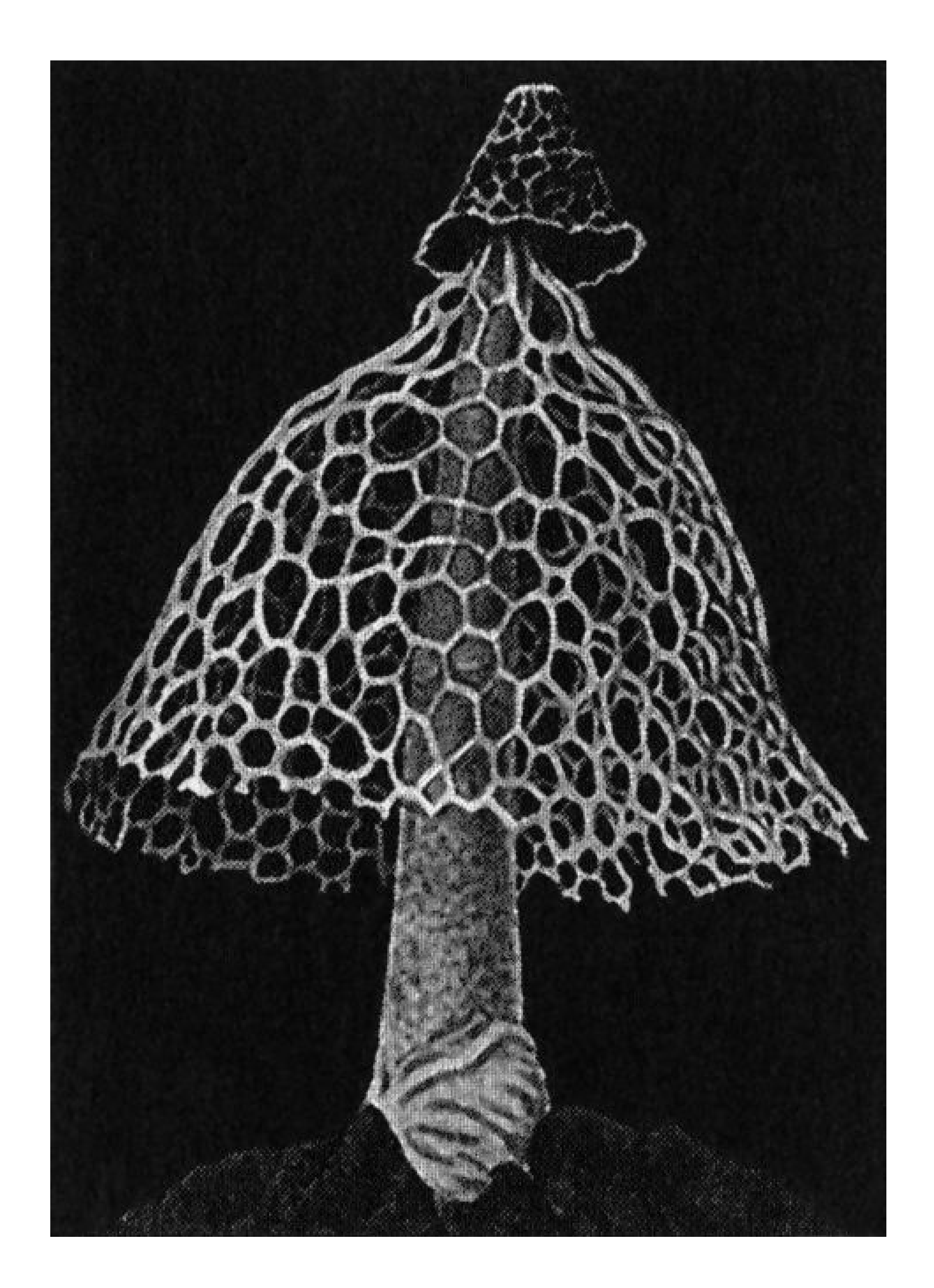
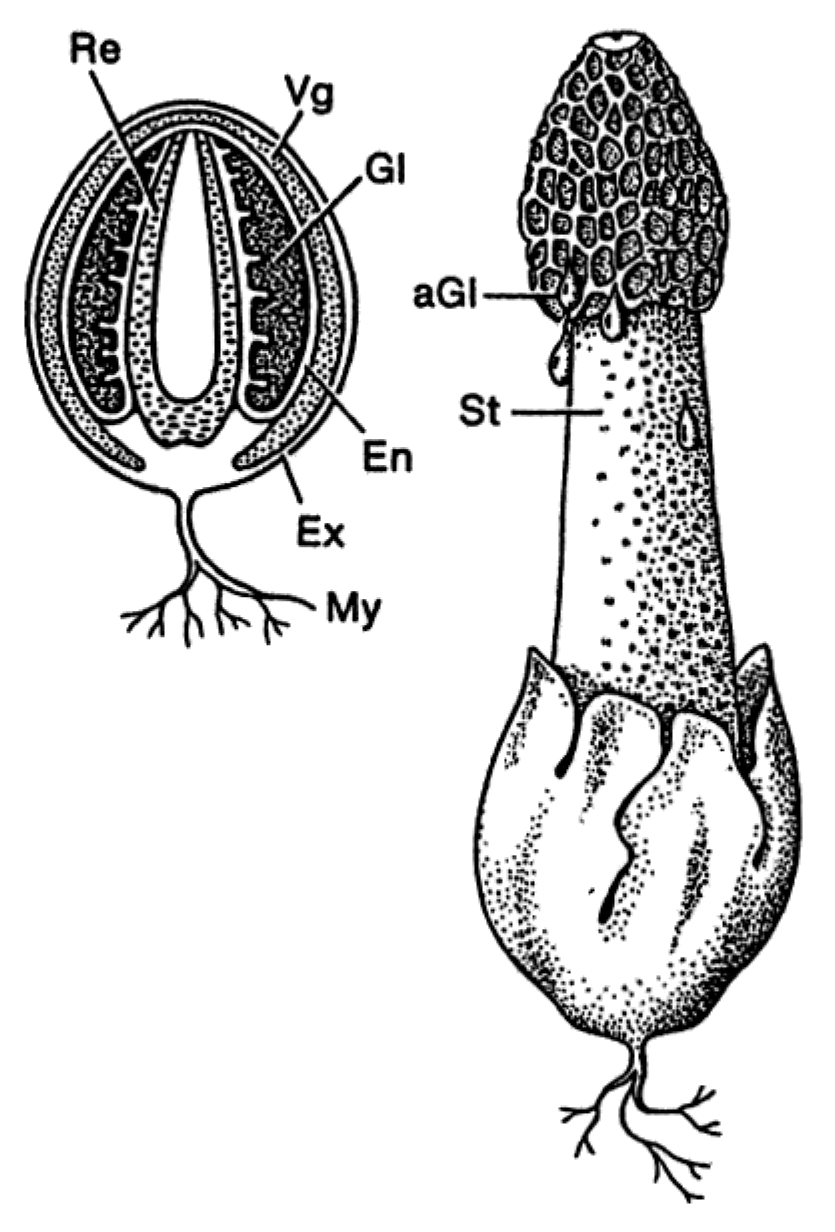


Abbildung 8: Stinkmorchel: a) Querschnitt durch den jungen Fruchtkörper (= Hexenei), Hüllschichten (En = Endoperidie, Ex = Exoperidie, Vg = Gallertschicht), My = Mycelstrang, Gl = Gleba (Fruchtmasse), Re = Receptaculum; b) reifer, aus dem Hexenei herausgewachsener Fruchtkörperstiel (St = gestrecktes Receptaculum, aGl = abtropfende Gleba mit den reifen Sporen); durch den stinkenden Geruch des reifen Pilzes werden Aasfliegen und Mistkäfer angelockt, die die Sporen verbreiten.



Die Fruchtkörper, in oder an denen die Sporen gebildet werden und die meist auch der Verbreitung der reifen Sporen dienen, weisen bei den Echten Pilzen vielfältige Formen auf. Sie können unscheinbar, nur wenige Millimeter groß sein oder einen dünnen, glatten oder schrumpeligen Belag auf dem Substrat bilden. Die Fruchtkörper der Porlinge, Blätter- und Nichtblätter-Pilze können gleichfalls nur wenige Millimeter, Zentimeter bis einige Dezimeter betragen. Man findet aber auch Blätterpilze, bei denen der Durchmesser des Hutes bis zu einem Meter beträgt, wie bei

einigen Termitenpilzen (*Termitomyces*) beobachtet. Der vorwiegend an Rotbuchen wachsende Mehrhütige Porling *Meripilus giganteus* besitzt einen Sammelfruchtkörper, der eine Höhe und Breite von etwa einem Meter erreicht und ein Gewicht von über 50 Kilogramm aufweisen kann. Auf unseren Wiesen und Weiden findet man den kugelförmigen Riesenbovist (*Langermania gigantea* = *Calvatia maxima*); sein Durchmesser kann bis etwa 50 Zentimeter und sein Feuchtgewicht auch mehrere Kilogramm betragen. In ihm werden mehrere Milliarden Sporen gebildet. Andere Pilze bilden wunderschöne, blumenartige Fruchtkörper (Abbildung 7) oder wachsen wie bei der Stinkmorchel aus sogenannten «Hexeneiern» heraus (Abbildung 8). Die sporenbildende Schicht (= Hymenium) an oder in den Fruchtkörpern kann gleichfalls sehr unterschiedlich ausgebildet sein.

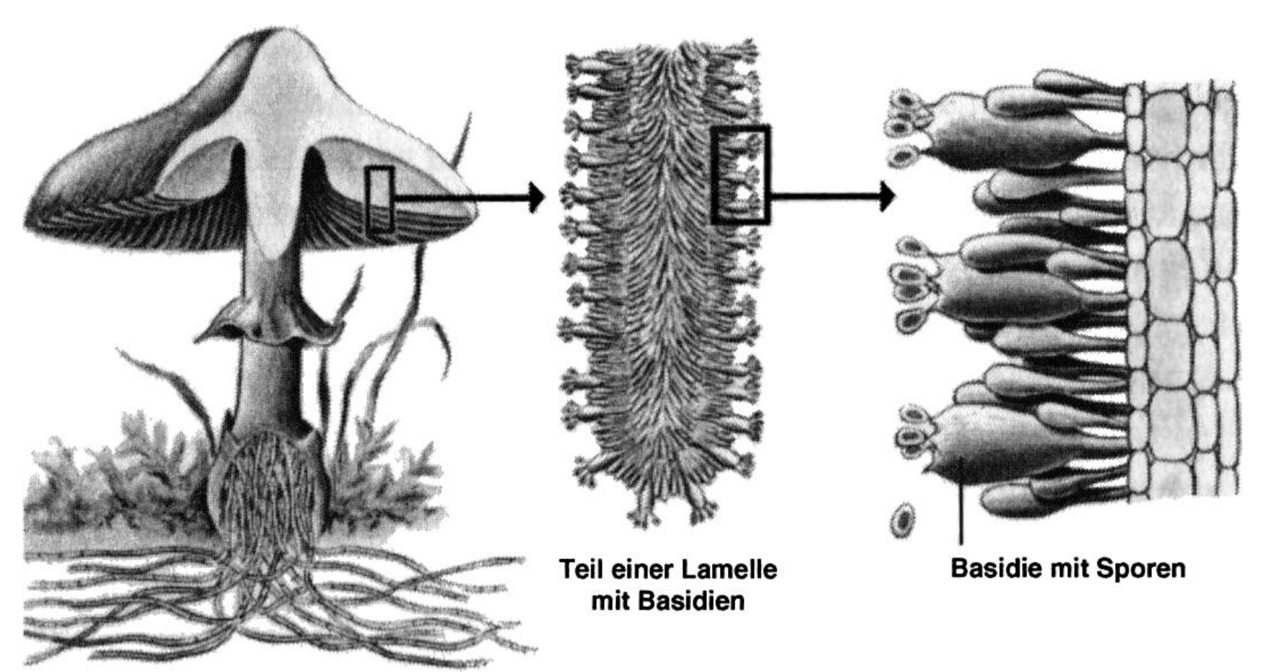


Abbildung 9: Typischer gegliederter Fruchtkörper eines Blätterpilzes. Die Ausschnitte zeigen einen Teil einer Lamelle mit der Fruchtschicht, an deren Außenseite sich die Basidien mit den Sporen entwickeln. Die reifen Sporen werden durch den Wind verbreitet.

Die Entwicklung der Sporen findet bei den Ständerpilzen auf einer glatten oder gefalteten Fruchtschicht oder in gegliederten Fruchtkörpern statt; die Fruchtschicht kann

beispielsweise wie beim Steinpilz in Röhren (Röhrenpilze), wie bei den meisten Baumschwämmen in Poren (Porenpilze), wie beim Champignon an Lamellen (Lamellen-, Blätterpilze) oder auch in geschlossenen Fruchtkörpern, beispielsweise bei den Bovisten und den Trüffeln, angelegt werden. Eine typische Anordnung von Basidien in der Fruchtschicht bei Blätterpilzen ist in Abbildung 9 skizziert.

Manchmal läßt sich nachts im Wald am Boden ein kaltes, grünliches Leuchten beobachten (= Biolumineszenz). Dieses Glimmen, das durch bestimmte enzymatische Reaktionen, ähnlich wie beim Glühwürmchen, verursacht wird, geht von Hölzern aus, die vom Mycel des Hallimaschs durchwachsen sind. Früher diente dieses Pilzleuchten bei nordischen Völkern zur Wegmarkierung und heute als skurrile Beleuchtung im Partygarten. In unseren Breiten findet man noch den Leuchtenden Ölbaumpilz (*Omphalotus olearius*), der schon von den Römern beschrieben wurde. Unter bestimmten Bedingungen leuchtet auch das Mycel einiger Helmlinge (*Mycena*-Arten). In den Tropen gibt es noch eine Reihe weiterer Leuchtpilze.

3. Pilze im Kohlenstoffkreislauf der Natur

Abbau von organischen Stoffen

Von größter Bedeutung für den Kreislauf der Stoffe in der Natur ist die Fähigkeit der Pilze, auch langkettige (polymere) Substanzen und komplexe organische Verbindungen sowie Ausscheidungsprodukte von Tieren zu zersetzen, die höhere Organismen nicht verwerten können oder bei diesen sogar als Gifte wirken. Pilze vermögen zusammen mit den anderen Mikroorganismen unter aeroben Bedingungen, im Atmungsstoffwechsel mit molekularem Sauerstoff, alle von Organismen biosynthetisch aufgebauten Verbindungen wieder abzubauen (= *Destruenten*). Es ist daher trotz des seit Millionen Jahren erfolgten Aufbaus organischer Substanzen durch die grünen Pflanzen keine dieser Verbindungen in größerem Umfang angereichert worden.

In der Photosynthese der Pflanze im Licht werden bei der Assimilation von Kohlendioxid (CO_2) hauptsächlich Zucker und verwandte Verbindungen aufgebaut. Auf dem Land werden etwa 60 % zu Holz synthetisiert, das zu 75 % aus langkettigen oder verzweigten Zuckerabkömmlingen (Polysacchariden) besteht (Cellulose, Hemicellulose, Stärke, Pektine und Arabinose). Lignin und ähnliche Verbindungen machen weitere 20 % der Holzsubstanz aus; der Proteingehalt ist dagegen gering (1–2 %).

Der hohe Anteil an Polysacchariden unter den Assimilationsprodukten der grünen Pflanzen macht es verständlich, daß Zucker als Nährstoff für die chemoheterotrophen Lebewesen, auch von Pilzen, von größter Bedeutung sind. Dabei dienen Glucose und andere einfache Zucker bevorzugt als Substrat für den Energie- und Aufbaustoffwechsel. Die Festlegung der Zucker in

langkettige oder verzweigte komplexe Verbindungen erfordert erst eine Zerlegung in die einfachen, einzelnen (monomeren) Bausteine. Im Boden sind vorwiegend Pilze und andere Mikroorganismen an der Zersetzung des polymeren Pflanzenmaterials beteiligt.

Pilze müssen komplexe und unlösliche Stoffe erst mit ausgeschiedenen Enzymen (Exoenzymen) außerhalb der Zelle aufschließen. Die einfacheren, löslich gewordenen Produkte können dann durch die Zellwand in die Zelle aufgenommen werden. Normalerweise verläuft der weitere Abbau im Atmungsstoffwechsel mit Sauerstoff bis zu den Endprodukten Kohlendioxid und Wasser. In diesem Energiestoffwechsel können aber auch, abhängig von den Umweltbedingungen, Zwischenprodukte (zum Beispiel organische Säuren) ausgeschieden werden. Außerdem werden auf Nebenwegen komplexe (sekundäre) Stoffwechselprodukte gebildet, beispielsweise Antibiotika oder Mykotoxine, die den Menschen und anderen Lebewesen nutzen, aber auch schaden können.

Cellulose ist der Grundbestandteil der Pflanzen. Im Boden ist der Celluloseanteil der Pflanzenrückstände sehr hoch (40–70 %), da Cellulose eine hohe mechanische Festigkeit aufweist, unlöslich ist und – besonders mit Lignin inkrustiert – nur langsam abgebaut wird.

Die celluloseabbauenden Enzyme (*Cellulasen*) sind Exoenzyme, die ausgeschieden werden oder an der Oberfläche der Zelle wirken, da Cellulose nicht in die Zelle aufgenommen werden kann. Der Abbau außerhalb der Zelle erfolgt bis zum Disaccharid *Cellobiose* oder bis zur *Glucose*. Unter aeroben Bedingungen sind Pilze die wichtigsten Cellulosezersetzer. Sie sind den Bakterien besonders in sauren Böden und beim Holzabbau (Cellulose + Lignin) überlegen. Die Cellulasen von Pilzen lassen sich im Gegensatz zu den entsprechenden Enzymen der Bakterien relativ leicht aus dem Medium abtrennen. Mit Cellulasen aus Pilzen (zum Beispiel *Trichoderma*-Arten) wird daher

versucht, Abfallpapier in industriellem Maßstab aufzuschließen, um es für die biologische Produktion von Ethanol verwenden zu können. *Fusarium*- und *Chaetomium*-Arten sind weitere wichtige Vertreter, die Cellulose abbauen. *Chaetomium*-Arten sind auch für die Alterung und Zersetzung von Baumwoll-Kleidung oder anderen cellulosehaltigen Produkten in tropischen Gebieten verantwortlich. Von größter Bedeutung ist auch der Aufschluß von Cellulose in der Symbiose von Pilzen mit Insekten (siehe Kapitel 4).

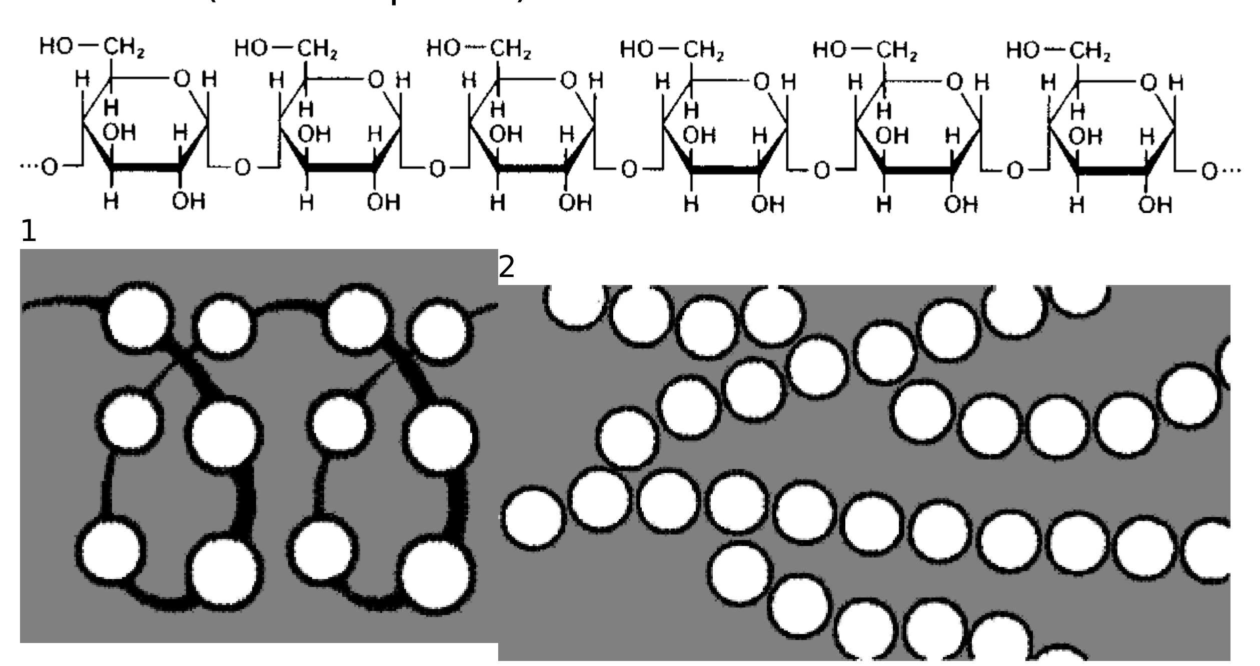


Abbildung 10: Stärke, 1) Ausschnitt aus der Strukturformel, 2) Aufbau der unverzweigten Amylose und 3) des verzweigten Amylopektins

Stärke ist der Hauptspeicherstoff der Pflanzen; sie setzt sich aus der langkettigen (polymeren) Glucose in Form der unverzweigten *Amylose* (15–27 %) und des verzweigten *Amylopektins* zusammen (Abbildung 10). Der Abbau erfolgt hauptsächlich außerhalb der Zelle durch Hydrolyse mit Amylase-Enzymen.

Die Fähigkeit, Stärke abzubauen, ist unter Mikroorganismen weit verbreitet und nicht auf bestimmte Mikroorganismengruppen beschränkt. Da die

alkoholbildenden Kultur-Hefen (Hefepilze) aber keine Amylasen ausscheiden, müssen zur Alkoholproduktion aus stärkehaltigen Substraten entweder technisch gewonnene Amylasen oder Amylasen des Malzes, die beim Keimen der Gerste entstehen, zugesetzt werden. Bei Naturvölkern wird auch Mundspeichel zur Vergärung von stärkehaltigen Grundstoffen (zum Beispiel Mais) verwendet (siehe Bier Seite 86). *Takaamylase* oder *Takadiastase* ist ein technisch gewonnenes Rohprodukt aus dem Schimmelpilz *Aspergillus oryzae*, das Stärke bis zur Glucose abbaut. Neben Pilzen sind auch aerobe und anaerobe Bakterien gute Stärkeabbauer.

Ligninabbau:

Ein wichtiger Bestandteil des Holzes ist Lignin (18–30 %), das im Boden außerordentlich langsam abgebaut wird und dadurch als Hauptquelle für den Humus im Boden dient. Die Zusammensetzung des Lignins ist sehr komplex. Die Grundbausteine sind zum größten Teil ringförmige Moleküle (Phenylpropan-Abkömmlinge), die durch verschiedenartige Verbindungen miteinander verknüpft sind. Die Zersetzung von Lignin erfolgt ausschließlich durch Mikroorganismen, größtenteils durch Ständerpilze. Gute Ligninabbauer sind beispielsweise der Schmetterlingsporling (*Polytictus versicolor*) und viele Schichtpilze (zum Beispiel *Stereum hirsutum*). Auch der parasitische Hallimasch (*Armillaria mellea*) greift Lignin (neben Cellulose) an.

Die holzzerstörenden Pilze können in zwei Gruppen unterteilt werden, die Erreger der Braunfäule (Destruktionsfäule) und die Erreger der Weißfäule (Korrosionsfäule). Bei der Braunfäule werden von den Pilzen bevorzugt Cellulose und andere Zuckerverbindungen (Hemicellulosen) abgebaut, während die Ligninbestandteile Zurückbleiben, so daß das Holz sich bräunlich verfärbt. Die

Weißfäule-Pilze greifen Cellulose und Lignin etwa gleichzeitig an; das Holz hat dann ein weißlich-bleiches Aussehen.

Einer der gefährlichsten, auch heute noch gefürchteten Holzzerstörer ist der Hausschwamm (*Serpula lacrymans*), der früher viele Holz- und Fachwerkhäuser zum Einstürzen gebracht hat. Er befällt anfangs feuchtes Holz im Gebäude, kann sich aber anschließend mit bleistiftdicken Mycelsträngen auf trockenem Holz, zum Beispiel im Dachstuhl, ausbreiten. Die Mycelstränge dienen als Wasserleitungen; außerdem gewinnt der Pilz Wasser beim Abbau der Glucose aus der Zersetzung des Holzes. Das Holz zerfällt beim Befall in rotbraune, würfelige Stückchen (= Braunfäule). Der gelbbraune, flache, wellige Fruchtkörper des Hausschwammes, der sich auf dem Holz und am Mauerwerk ausbreitet, kann die Größe von einem Quadratmeter erreichen. Der Hausschwamm zerstört nicht nur Holz; seine Stoffwechselprodukte können beim Menschen Übelkeit und Kopfschmerzen verursachen, außerdem lösen seine Sporen allergische Reaktionen aus.

4. Pilze als Symbiosepartner von Pflanzen und Tieren

Wechselbeziehungen zwischen Pilzen und anderen Organismen

In der Natur leben – von Ausnahmen abgesehen – Mikroorganismen mit anderen Mikroorganismen oder höheren Pflanzen und Tieren zusammen. Zwischen den verschiedenen Lebewesen bilden sich mehr oder weniger enge Beziehungen aus, die ernährungsphysiologische oder ökologische Ursachen haben können. Besonders enge Wechselbeziehungen in einer Lebensgemeinschaft mit räumlichem Kontakt zwischen artverschiedenen Organismen werden nach H. A. de Bary (1831–1888) als *Symbiosen* bezeichnet. Man kann Symbiosen auch als eine besondere Form der Anpassung an die Umweltbedingungen ansehen, bei der die Verbindung mit anderen Lebewesen Vorteile im «Kampf ums Überleben» bringt. Der größere symbiontische Partner wird allgemein als *Wirt* bezeichnet, der kleinere als *Symbiont*.

Die symbiontischen Beziehungen zwischen zwei oder mehreren Organismen können aber sehr unterschiedlich sein. Meist versteht man unter Symbiose allgemein nur die *mutualistische Symbiose* (*Mutualismus*), ein lockeres Zusammenleben der Partner, und die Eusymbiose (*echte Symbiose*), in der die Partner in engem Kontakt leben; in beiden Symbioseformen haben Wirt und Symbiont durch das Zusammenleben Vorteile. Bei vielen echten Symbiosen ist diese enge Lebensgemeinschaft sogar für ein Überleben beider Partner notwendige Voraussetzung.

Das Gegenteil des nützlichen Zusammenlebens zwischen Organismen ist der Parasitismus, bei dem nur ein Partner, der *Parasit*, Nutzen aus dem Zusammenleben zieht,

während der andere Partner geschädigt oder sogar getötet wird; dieses parasitische Verhältnis wird auch (in amerikanischen Lehrbüchern) als *parasitische Symbiose* bezeichnet. Viele pilzliche Krankheitserreger von Tieren und Pflanzen sind *obligate Parasiten*, die außerhalb des Wirtes nicht wachsen können. Die *fakultativen Parasiten* sind dagegen nicht auf eine parasitäre Lebensweise angewiesen, sondern können in der Natur auch auf totem Material wachsen und im Labor auf Nährböden kultiviert werden.

Wird der Wirt vom Symbionten nicht merklich geschädigt oder gefördert, so spricht man auch von *Kommensalismus* oder *kommensalistischer Symbiose* (in amerikanischen Lehrbüchern). Es ist oft schwierig festzustellen, welche Form der Symbiose vorliegt. Durch einen Wechsel der Umweltbedingungen kann sich auch das Zusammenleben ändern, so daß zum Beispiel eine echte Symbiose in einen Parasitismus übergehen kann (und umgekehrt).

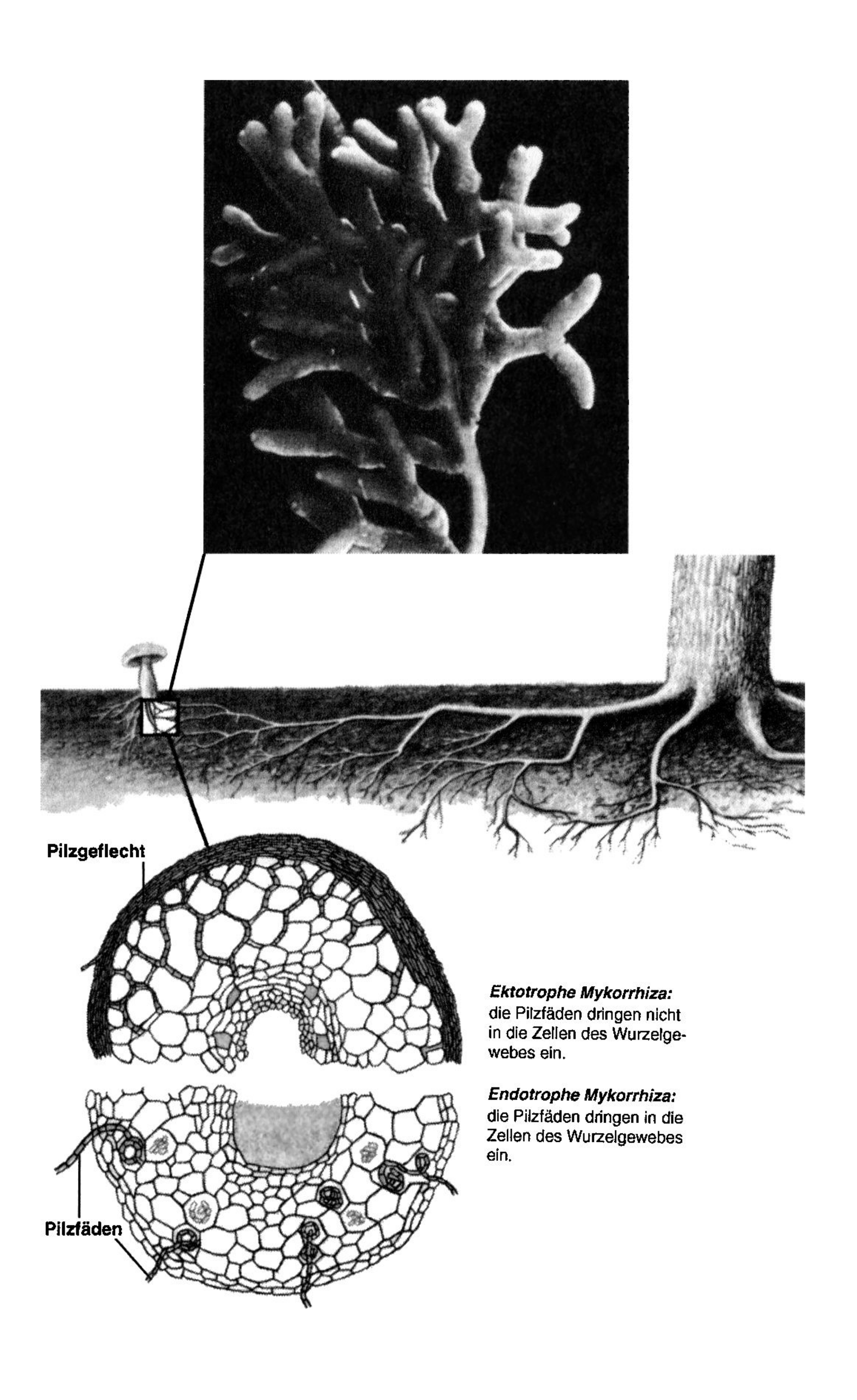
In der für beide Partner nützlichen echten Symbiose kann der Symbiont außerhalb der Wirtszellen leben, man spricht dann von einer *Ektosymbiose*. Wächst der Symbiont dagegen innerhalb der Zellen, so liegt eine *Endosymbiose* vor. Die Zuordnung zu diesen beiden Symbioseformen ist aber nicht immer einfach, da es viele Übergänge gibt.

Die gesamten Funktionen und die gegenseitige Beeinflussung der Partner in einer nützlichen, symbiontischen Gemeinschaft sind oft nicht oder noch nicht vollständig bekannt. In vielen Fällen läßt sich der Symbiont nicht einmal allein ohne Wirt kultivieren, so daß der Stoffwechsel dieses *obligaten Symbionten* nicht in Reinkultur untersucht werden kann. Allgemein lassen sich vier wichtige Hauptfunktionen bei der symbiontischen Partnerschaft unterscheiden: eine *Schutzwirkung*, eine Einstellung *günstiger Umweltbedingungen* für die Entwicklung und das Wachstum, eine Bereitstellung von *Nährsubstraten* und eine Ausbildung von *Erkennungssignalen*.

Symbiose von Pilzen mit grünen Pflanzen

Mykorrhizabildung.

Abbildung 11: Unten: Querschnitt durch die Pflanzenwurzeln bei einer ektotrophen und einer endotrophen Mykorrhiza; oben: umgewandelte, verkürzte, korallenförmige Endwurzeln eines Baums bei einer ektotrophen Mykorrhiza mit Pilzen.



Ektotrophe Mykorrhiza:
die Pilzfäden dringen nicht in die Zellen des Wurzelgewebes ein.

Endotrophe Mykorrhiza:
die Pilzfäden dringen in die Zellen des Wurzelgewebes ein.

Die Wurzeln vieler höherer Pflanzen sind außen von *Pilzen* infiziert. Bei den meisten Waldbäumen (besonders Koniferen, Buchen, Eichen) ist dann um die Wurzeln ein dichtes Pilzgeflecht (*Mycel*) ausgebildet. Es entstehen Pilzwurzeln (*Mykorrhizen*). Der Botaniker A. B. Frank erkannte als erster diese Lebensgemeinschaft und nannte sie Mykorrhiza (von griechisch *myces* = Hutpilz, *rhiza* = Wurzel, 1885). Durch Wuchsstoffabgabe der Pilze werden die Wurzeln dick und korallenförmig verzweigt, und Wurzelhaare, die feinen Endwurzeln der Bäume, sind nicht mehr zu erkennen (Abbildung 11). Die Pilzhyphen dringen auch noch zwischen die Zellen der Rindenschicht, in der Regel aber nicht in die Zellen ein (= *ektotrophe Mykorrhiza*). Der Pilz versorgt den Baum mit Wasser und Nährsalzen. Sein Mycel fungiert als verlängertes «Wurzelgeflecht», das diese Stoffe effektiver als die normalen, kurzen Saugwurzeln der Bäume aufnehmen kann. Da das Pilzmycel nicht nur die Wurzeln umhüllt, sondern sich weit im Waldboden ausbreitet, ist die Versorgung mit diesen Stoffen, auch wenn sie nur in sehr geringer Konzentration vorliegen, deutlich verbessert. Ein weiterer Vorteil für die Bäume ist ein gewisser Schutz der Wurzeln vor parasitischen Boden-Pilzen. Auch für die Mykorrhiza-Pilze ist das Zusammenleben mit den Bäumen von Nutzen, da sie von dem photosynthetischen Wirt direkt mit verwertbaren organischen Verbindungen versorgt werden. Der Vorteil für die Pilze zeigt sich auch darin, daß viele nur in Symbiose mit den Baumwurzeln Fruchtkörper bilden. Zu diesen Formen gehören viele geschätzte Speisepilze, beispielsweise Trüffeln (*Tuber*-Arten), der Echte Pfifferling (*Cantharellus cibarius*) und der edle Steinpilz (*Boletus edulis*). Diese Arten lassen sich im Gegensatz zum Champignon nicht als Kulturpilze züchten. Nur bei sehr kostbaren Pilzen, wie bestimmten Trüffeln, lohnt es, eine künstliche Vorkultur des Mycels anzulegen; zur Fruchtkörperbildung müssen aber die

Pilzfäden an Wurzeln von Eichen oder anderen Mykorrhizabäumen im Wald ausgepflanzt werden. Meldungen, daß Kulturbedingungen gefunden wurden, die bei Trüffeln zur Fruchtkörperbildung auf Nährböden führten, konnten bisher nicht bestätigt werden.

Eine Symbiose ist bei knappem Nährstoffangebot besonders stabil, bei einem zu hohen Gehalt an Stickstoffverbindungen kann die Mykorrhizabildung jedoch stark zurückgehen. So besteht die Gefahr, daß bei einer Düngung von Wäldern das Wachstum der Bäume sich nicht verbessert, sondern sich sogar verschlechtert. Es wird auch angenommen, daß für das Waldsterben in Mitteleuropa die Überdüngung der Bäume mit Ammonium und anderen Düngerstoffen aus der Luft mit verantwortlich ist.

Die Mykorrhiza-Pilze gehören zu den *Ständerpilzen*, den Vertretern unserer typischen Hutpilze. Meist leben sie mit verschiedenen Baumarten zusammen. Sie bevorzugen jedoch oft entweder Laubbäume (wie der Knollenblätterpilz) oder Nadelbäume (wie der Butterröhrling, Sandröhrling und Grünling). Einige Pilzarten sind (fast) ausschließlich an bestimmte Baumarten gebunden. Auffällig sind beispielsweise die vielen Lärchenbegleiter, die nur an Lärchen Vorkommen (zum Beispiel Goldgelberund Hohlfuß-Lärchenröhrling sowie die Blätterpilze Gefleckter Gelbfuß- und der Lärchenmilchling).

Welche Pilzart auftritt, ist von der Gehölzart, aber oft auch vom Bodentyp abhängig. Einige Formen wachsen ausschließlich auf Kalkböden, andere bevorzugen saure Silikatböden. Es gibt aber auch Pilze, die sowohl auf kalkhaltigen als auch auf sauren Böden Vorkommen.

Vor kurzem wurde eine ungewöhnliche Symbiose-Gemeinschaft zwischen einem Lacktrichterling (*Laccaria bicolor*) und Kiefernwurzeln gefunden. Der Pilz infiziert und verdaut Springschwänze im Boden. Die dabei freigesetzten Stickstoffverbindungen werden zum Baum weitergereicht,

als Lohn erhält der Pilz organische Produkte von den Wurzeln.

Neben der ektotrophen Mykorrhiza an den Baumwurzeln ist auch eine *endotrophe Mykorrhiza* bei Pflanzen weit verbreitet, bei der die Pilzhyphen in die Wurzelzellen eindringen (Abbildung 11, Seite 30). Die häufigste Form dieses Zusammenlebens ist die (V)A-Mykorrhiza (vesiculär-arbusculäre Mykorrhiza), bei der das intrazelluläre Pilzmycel in den Wurzelrindenzellen zu Vesikeln anschwillt oder bäumchenartige Verzweigungen (Arbuskeln) ausbildet. Wichtiger Pilzpartner für eine Reihe landwirtschaftlich bedeutsamer Pflanzen (zum Beispiel Mais, Sojabohne, Tabak, Zuckerrohr, Äpfel) ist *Glomus*, ein Jochpilz (Zygomycet). Obwohl der Pilz den Pflanzen Nährsubstanzen entzieht, wachsen diese besser als ohne Symbiont, weil sie vermutlich auch in dieser Symbiose eine günstigere Versorgung mit Wasser und Mineralsalzen erhalten.

Während die Pilz-Symbiose das Wachstum der Waldbäume und der meisten anderen Pflanzen «nur» verbessert, gibt es eine Reihe von Pflanzen, die für ihre Entwicklung auf Pilze angewiesen sind. Diese obligate Symbiose findet man bei Orchideen. In ihrem staubfeinen Samen besteht der Embryo nur aus wenigen Zellen und besitzt nicht genügend Reservestoffe, um sich vollständig zu entwickeln. Der Keimling ist daher auf spezielle Pilze, die *Ammenpilze*, angewiesen, um voll auszuwachsen. Zur Ausbildung einer Wurzel und der ersten kleinen grünen Blättchen nutzt der Keimling den Pilz als organische, eiweißreiche Nahrungsquelle, außerdem wird er vom Pilz wiederum mit Wasser und Mineralsalzen versorgt. In den erwachsenen Pflanzen verändert sich das Zusammenleben von Pilz und Orchidee; es bildet sich eine endotrophe Mykorrhiza-Symbiose aus.

Andere Orchideen, wie die Vogelnestwurz (*Neottia nidusavis*), die kein Blattgrün besitzen und daher keine

Photosynthese ausführen können, leben vollständig auf Kosten von Pilzen.

Eine besondere Art des Zusammenlebens von Pflanze und Pilz, ein Zusammenspiel von Parasitismus und echter Symbiose, findet man beim farblosen Fichtenspargel (*Monotropa hypopitys*). Zum Wachsen dienen diesen Pflanzen gleichfalls Pilze als organische Nahrungsquelle. Wenn Pilzhyphen in die Wurzeln eindringen, werden sie zum Platzen gebracht und ihr Inhalt von der Pflanze verwertet. Da die Pilze gleichzeitig in Symbiose mit Waldbäumen leben, ernähren sich die parasitischen Pflanzen indirekt (über den Umweg Pilzmycel) von der Photosynthese grüner Pflanzen.

Eine ähnliche parasitische Lebensweise wie beim Fichtenspargel wurde auch bei bestimmten Lebermoosen gefunden. So wächst ein bleiches, weltweit verbreitetes Lebermoos (*Cryptothallus mirabilis*) unter dem Laubstreu des Waldes in engem Kontakt zum Pilzgeflecht der benachbarten Baumwurzeln im Boden. Das Mycel von Pilzen der Gattung *Tulasnella*, die auch als Partner von Orchideen bekannt sind, lässt sich in verschiedenen Zellarten der Pflanze nachweisen. Über das Pilzmycel ernähren sich die Lebermoospflänzchen gleichfalls indirekt von den organischen Stoffen, die durch die Photosynthese der Bäume gewonnen wurden.

Eine endosymbiontische Lebensgemeinschaft von Pilzen (*Glomus*-ähnliche Formen) mit Pflanzen konnte bereits in verkieselten Fossilien aus dem Devon (circa 400 Millionen Jahre alt) nachgewiesen werden. Von einigen Forschem wird angenommen, daß die Eroberung des Landes durch Pflanzen erst durch eine Symbiose mit Pilzen ermöglicht wurde.

Flechten.

Eine weitere Lebensgemeinschaft von Pilzen mit anderen Organismen, die Licht als Energiequelle nutzen, sind die

Flechten (*Lichenes*). Diese Lebensform ist eine sehr enge symbiontische Gemeinschaft eines Pilzes (dem *Mycobionten*) mit photoautotrophen Algenarten (Grünalgen) oder Cyanobakterien (= Blaualgen), den *Photobionten* (früher *Phycobionten* genannt). Da das Aussehen der verschiedenen Flechten sehr konstant ist, wurden die einzelnen Formen bis zur Mitte des 16. Jahrhunderts für einen einzigen Organismus gehalten. Der Vegetationskörper (Thallus) ist für jede Flechten-«Art» charakteristisch, so daß die Flechten früher als eigene systematische Klasse im Pflanzenreich geführt wurden und oft auch noch geführt werden, obwohl eigentlich ein *Doppelorganismus* vorliegt. Es gibt etwa 16 000 Flechten-«Arten», andere Schätzungen sprechen auch von bis zu 20 000 unterschiedlichen Formen dieser hochentwickelten Symbiosegemeinschaft.

Die deutsche Benennung der Flechten erfolgt nach der Wuchsform. Auffällig, wahrscheinlich schon von jedem beobachtet, sind die gelben Überzüge auf Felsen im Gebirge. Diese Krustenflechten wachsen flächig, fest mit der Unterlage verbunden nicht nur auf Gestein, sondern auch auf Erde, Rinde und anderen Unterlagen. Die Laubflechten wachsen hauptsächlich in die Fläche, sind lappig geteilt und mit dem Substrat durch Hyphenstränge verbunden. Bei der Strauchflechte, zu der auch die an Bäumen herabhängenden Bartflechten und Bandflechten zählen, dominiert das Längenwachstum; sie sitzen mit schmaler Basis an der Unterlage fest und verzweigen sich strauchartig. Als Gallertflechten werden Formen bezeichnet, die im feuchten Zustand eine gallertige Konsistenz aufweisen. An den Gallertflechten erkannte de Bary (1866) als erster die Doppelnatur dieser Flechte. Ein Jahr später postulierte Simon Schwendener, daß alle Flechten sich aus Pilzen und einem photoautotrophen Partner zusammensetzen.

Den Hauptteil der Flechten macht das Mycelgeflecht der Pilze aus, das in der Regel auch die Form bestimmt, so daß

sich neuerdings zunehmend die Einordnung der Flechten bei den Pilzen durchsetzt. Der Pilzpartner gehört hauptsächlich zu den Schlauchpilzen (Ascomyceten), seltener zu den Ständerpilzen (Basidiomyceten) oder den asexuellen Pilzformen (Fungi imperfecti). Im Gegensatz zu der hohen Artenzahl der Flechten sind nur etwa 100 unterschiedliche Photobionten bekannt, hauptsächlich Grünalgen (zum Beispiel Arten der Gattung *Trebouxia* oder *Trentepohlia*). Cyanobakterien sind nur bei etwa 10 % der Flechten zu finden (zum Beispiel *Nostoc*-Arten). In wenigen Fällen (3–4 %) können auch Grünalgen und Cyanobakterien gleichzeitig als Symbionten vorliegen (= *Cephalodien*). Die Cyanobakterien in den oberen Schichten der Flechte sind dann wahrscheinlich hauptsächlich für eine Stickstoff-Fixierung verantwortlich.

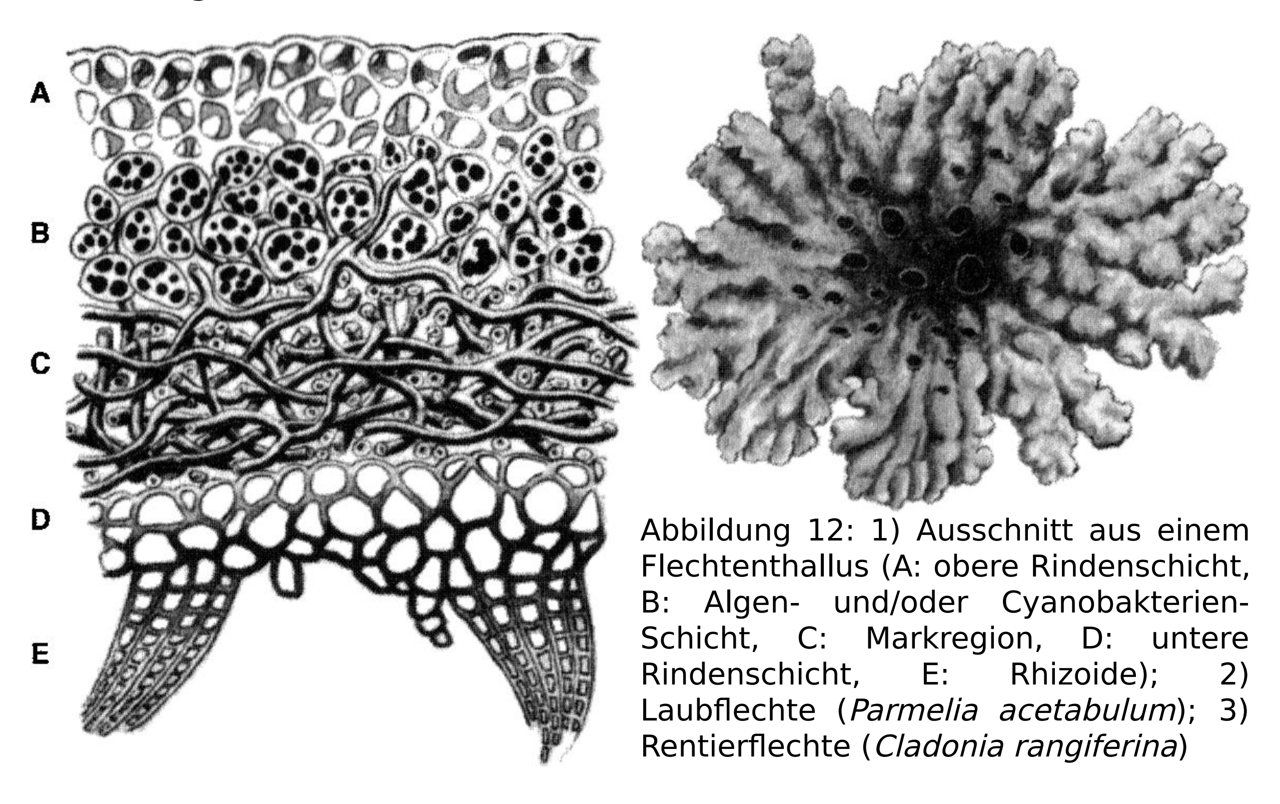
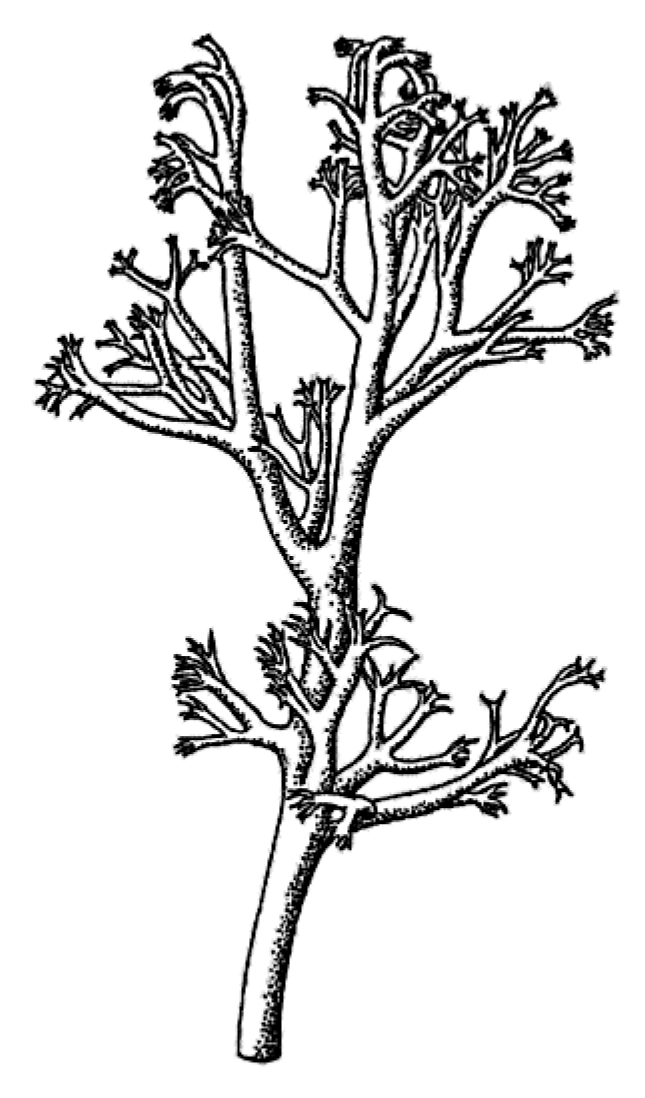


Abbildung 12: 1) Ausschnitt aus einem Flechtenthallus (A: obere Rindenschicht, B: Algen- und/oder Cyanobakterien-Schicht, C: Markregion, D: untere Rindenschicht, E: Rhizoide); 2) Laubflechte (*Parmelia acetabulum*); 3) Rentierflechte (*Cladonia rangiferina*)



In den Flechten bilden Pilze mit ihrem Partner eine morphologische, physiologische und ökologische Einheit. Der enge physiologische Kontakt zwischen den Symbionten wird dadurch erreicht, daß die Pilzhyphen sich eng an die Zellen der Algen oder Cyanobakterien anlegen und in einigen Fällen in die Zellen eindringen (Abbildung 12). Die Saugzellen (*Haustorien*) der Pilze durchwachsen aber nur die Zellwand, nicht die Cytoplasmamembran des Symbionten. Die Flechtenpilze sind fast durchweg auf die Symbiose mit dem photoautotrophen Partner angewiesen und kommen nicht freilebend vor, sind also in der Natur nur von der Flechte bekannt. Die Flechtenalgen beziehungsweise Cyanobakterien leben dagegen in der

Natur auch ohne Symbiosepartner. In der Flechte erhält der Pilz vom photoautotrophen Symbionten die notwendigen Kohlenhydrate. Die Vorteile für die Algen beziehungsweise Cyanobakterien liegen darin, daß sie in der Umhüllung durch das Hyphengeflecht vor raschem Wasserverlust und vor algenfressenden Tieren geschützt sind; außerdem könnte eine bessere Versorgung mit Mineralien stattfinden. Die Vermehrung der Flechten erfolgt hauptsächlich ungeschlechtlich durch Thallusbruchstücke (*Isidien*) oder einzelne von Pilzschläuchen dicht umsponnene Algenzellen (*Soredien*). Die Pilze können sich aber auch geschlechtlich fortpflanzen, wobei sie typische Pilzfruchtkörper, zum Beispiel kleine gestielte Becherchen, bilden. Die Flechtengemeinschaft ist nicht an einen spezifischen Partner gebunden; so kann eine bestimmte Alge mit vielen Flechtenpilzen zusammenwachsen (und umgekehrt).

Flechten kommen von den polaren Regionen bis zu den Tropen vor, doch werden besonders extreme Standorte von ihnen besiedelt (= «Pionierpflanzen»), an denen keiner der Partner für sich allein existenzfähig wäre. Viele wachsen unter kargen Bedingungen an Baumstämmen oder an nackten Felsen im Hochgebirge, wo andere Lebewesen nicht gedeihen können. In vielen Fällen sind sie auch die hauptsächlichen Bewohner extremer Standorte, etwa in Wüsten oder polaren Regionen. Sie halten monatelang Trockenheit aus und können in einer halben Minute ihren Wassergehalt von 2 % auf 300 % des Trockengewichts erhöhen. Vor allem in kalten Regionen der Erde bilden sie den Hauptanteil der Vegetation, dank ihrer hohen Kälteresistenz und der außergewöhnlichen Fähigkeit vieler Arten, bis weit unter dem Gefrierpunkt Photosynthese zu betreiben; an schneebedeckten Flechten konnte bis zu Temperaturen von −20 °C eine Photosynthese (in Spuren) nachgewiesen werden. In Wüsten vermögen Flechten ihren Wasserhaushalt allein aus dem Nebelniederschlag oder dem Taufall zu decken.

Abbildung 13: Chemische Formel der Usninsäure

Die besondere Fähigkeit der Flechten, Felsgestein aufzuschließen, ist sicherlich mit der Abgabe von organischen Säuren, den *Flechtenstoffen* (Flechtensäuren), verbunden, die herausgelöste Metalle an organische Moleküle zu binden vermögen. Die Flechtenstoffe werden meistens nur in der Flechtensymbiose gebildet. Es gibt mehr als 100 verschiedene Verbindungen. In vielen Fällen zeigen die Flechtenstoffe antibiotische Eigenschaften; die wichtigste Verbindung ist die *Usninsäure* (Abbildung 13). Flechten, wie das Isländische Moos, wurden in der Volksmedizin bei Lungentuberkulose angewandt, noch heute wird es in der Medizin als Hustenmittel verwendet. Nach Entfernung der Bitterstoffe wurde diese Flechte in Notzeiten auch als Nahrungsmittel genutzt. Das biblische Manna oder «heilige Brot» bestand vermutlich auch aus Flechtenmehl (Mannaflechte). *Mannaflechten* und Iwatake werden im Orient und Ostasien gegessen. Einige Flechten-Arten liefern Farbstoffe (Flechtenfarbstoffe) zum Färben tierischer Fasern (zum Beispiel Schafwolle) oder Duftstoffe für die Herstellung von Parfüm.

Das reiche Vorkommen von Flechten in arktischen Gebieten ermöglichte den Menschen mit Haustieren ein Vordringen in den hohen Norden, da verschiedene Flechten den Rentieren als Winternahrung dienen. Die Rentierflechte (*Cladonia rangiferina*) wird wegen ihrer Bitterstoffe wenig gefressen; in Skandinavien wird aus ihr Alkohol gewonnen. Die giftige Wolfsflechte (*Letharia vulpina*) wurde, zerrieben und mit

Lockstoffen versetzt, in gerissene Rentiere eingebracht, um mit diesem Köder Wölfe zu vergiften.

Die meisten Flechten wachsen extrem langsam: Der Durchmesser vergrößert sich oft nur um weniger als 1 Millimeter pro Jahr; bei einigen Arten kann er jedoch auch um 2–3 Zentimeter im Jahr zunehmen.

Flechten sind *extrem* empfindlich gegen eine Luftverschmutzung und können daher als Indikator für eine Luftverunreinigung dienen.

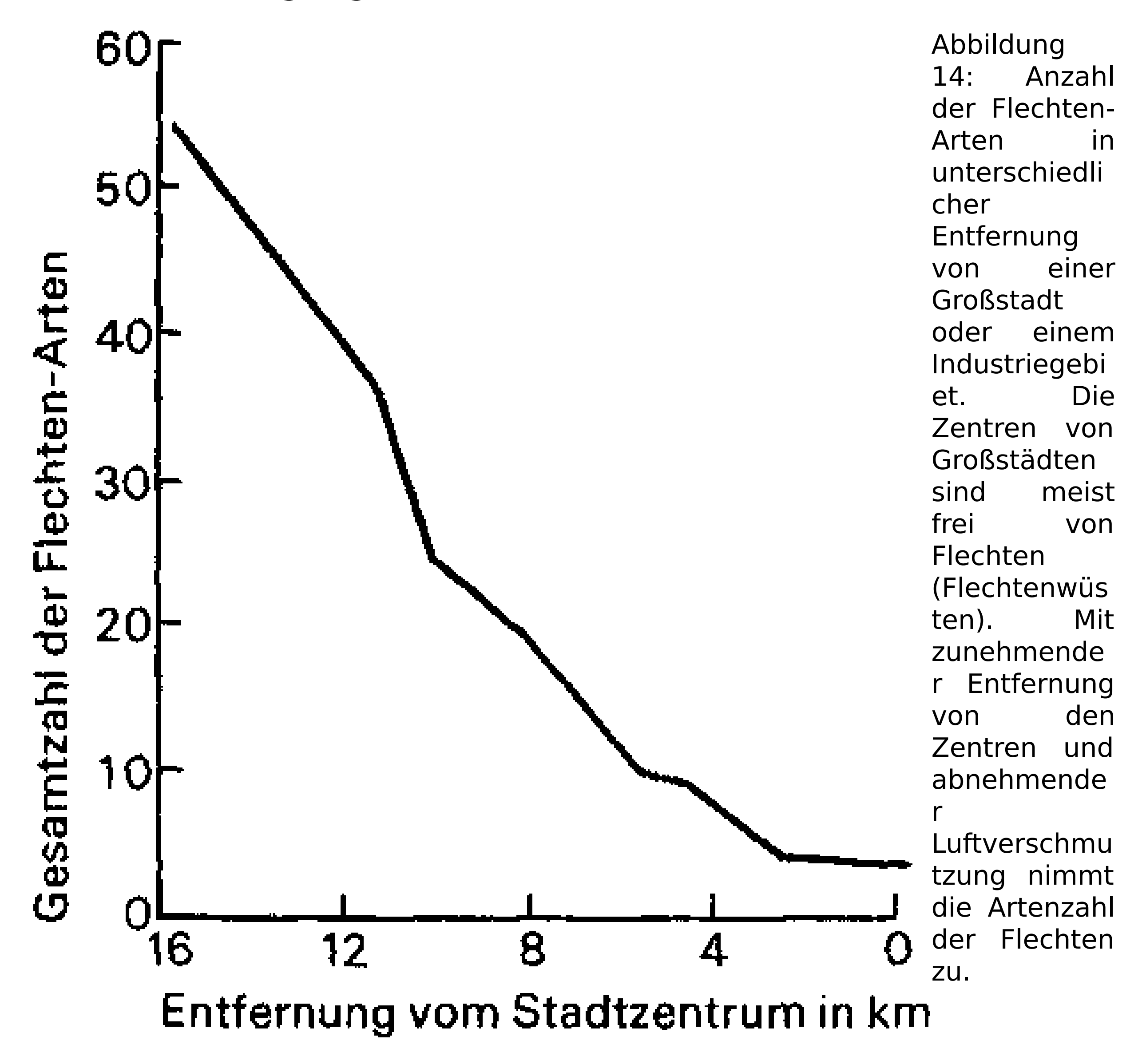


Abbildung 14: Anzahl der Flechten-Arten in unterschiedlicher Entfernung von einer Großstadt oder einem Industriegebiet. Die Zentren von Großstädten sind meist frei von Flechten (Flechtenwüsten). Mit zunehmender Entfernung von den Zentren und abnehmender Luftverschmutzung nimmt die Artenzahl der Flechten zu.

Die Fähigkeit, geringste Nährstoffmengen auszunutzen, wirkt sich in der Umgebung der Städte dagegen negativ

aus, da die Flechten auch Schadstoffe aus dem Regenwasser konzentrieren und somit schnell eine toxische Konzentration in den Zellen erreicht wird. Aus der Artenzahl der Flechtenvegetation kann daher der Grad der Luftverunreinigung gemessen werden (Abbildung 14). Besonders schädlich für Flechten ist Schwefeldioxid.

Die Anreicherung von Schadstoffen durch Flechten hatte auch nach dem Unglücksfall im Kernreaktor von Tschernobyl schwerwiegende Folgen für das Volk der Samen in Nordskandinavien. Da ihre Rentiere die mit radioaktivem Caesium verseuchten Flechten als Nahrung aufnahmen, wies ihr Fleisch auch zeitweilig eine sehr hohe Radioaktivität auf, so daß es für den menschlichen Verzehr nicht mehr geeignet war.

Pilze und Nahrungsaufschluß bei Tieren

Eine große Anzahl von Tieren ernährt sich von Holz oder Pflanzen, die hauptsächlich aus Cellulose und Lignin bestehen. Bis auf wenige Ausnahmen können die Enzyme zum Abbau dieser komplexen Naturstoffe nicht von Tieren gebildet werden. Die holzfressenden Tiere sind somit von einer Symbiose mit Mikroorganismen, hauptsächlich Pilzen und Bakterien, abhängig, die ihnen die Nahrung aufschließen und außerdem bei einseitigem Substrat noch lebenswichtige Ergänzungsstoffe (zum Beispiel Vitamine) liefern. So ermöglicht die Aktivität der symbiontischen Mikro-Organismen es erst, daß diese Insekten von einseitig zusammengesetzter Nahrung (Blut, Pflanzensaft, Holz) leben können und damit für sich Nahrungsquellen erschließen, die sie sonst nicht nutzen könnten. Es ist daher nicht verwunderlich, daß die Übertragung des Symbionten nur in wenigen Fällen dem Zufall (zum Beispiel bei der Nahrungsaufnahme) überlassen wird. Meistens sind besondere Verhaltensweisen und Einrichtungen ausgebildet,

die eine sichere Weitergabe der Symbionten an die nächste Generation gewährleisten.

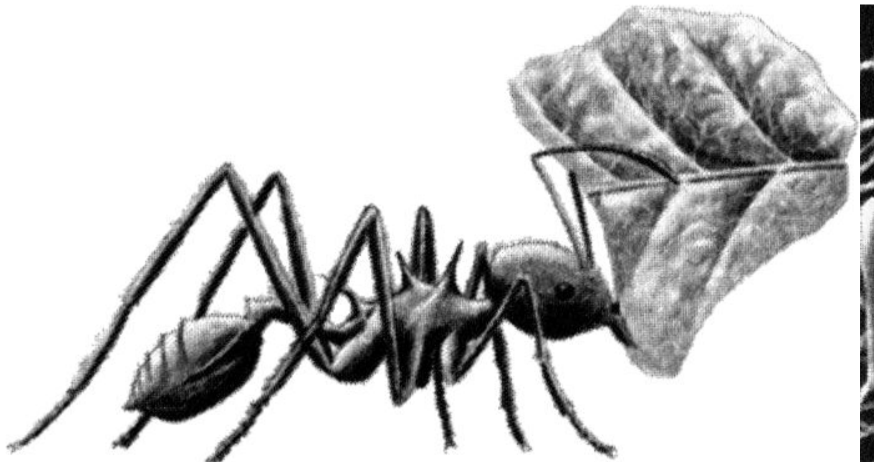
Pilzzüchtende Insekten.

Eine bemerkenswerte Weiterentwicklung der Symbiose zur Verwertung von Nährstoffen, die der tierische Organismus nicht allein verwerten kann, finden wir bei einigen Insekten. Im Gegensatz zu den Wiederkäuern, bei denen im Pansen fast ausschließlich Bakterien die Nahrung aufschließen, nutzen viele Insekten die Fähigkeit von Pilzen aus, Pflanzenmaterial zu verwerten. Einige Arten der Blattschneiderameisen kultivieren sogar ihre Pilze und legen regelrechte «Pilzgärten» an.

Diese gezielte Erschließung von Nahrungsquellen ist bereits im Tertiär vor rund 50 Millionen Jahren von staatenbildenden Ameisen «erfunden» worden. Zu den modernen Nachfahren dieser «Gärtner» gehören die heutigen Blattschneiderameisen (*Acromyrmex*, *Atta* und andere). Die etwa 200 Arten leben in warmen und feuchten Tropenwäldern Amerikas, wo sie durch ihre besondere Lebensweise auffallen.

In endlosem Zug marschieren sie unablässig von ihrer unterirdischen Nestanlage zu den Bäumen und Sträuchern in der näheren Umgebung, um dort mit ihren messerscharfen Mundwerkzeugen große Blattstücke herauszuschneiden und heimzuschleppen (Abbildung 15). Die «Transportwege» sind fünf bis sieben Zentimeter breit und können bis etwa 800 Meter lang sein. Ihr Gewimmel auf gut erkennbaren Pfaden durch die Wälder, ihre unablässige Plünderung der Bäume, durch die junge Pflanzungen von Apfelsinen, Mango und Zitronen vernichtet wurden, ist bereits von Thomas Belt 1874 in seinem Buch «The naturalist in Nicaragua» beschrieben worden. Auch heute verursachen die Blattschneiderameisen noch große

wirtschaftliche Schäden in der Landwirtschaft, da sie in einigen Gebieten die Aufforstung verhindern.



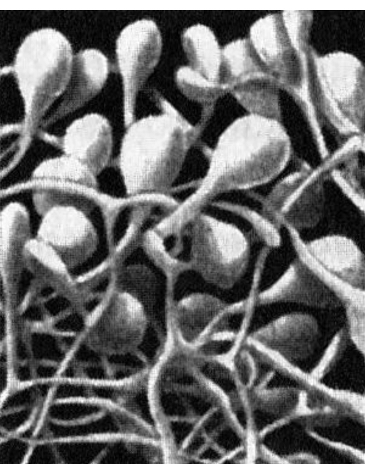


Abbildung 15: 1) Blattschneiderameise mit abgeschnittenem Blattstück. 2) «Kohlrabibildung» an den symbiontischen Pilzhyphen im Nest der Blattschneiderameisen; das gestauchte Mycelwachstum wird durch Beschneiden der Hyphen und durch eine Wuchsstoffabgabe von den Ameisen erreicht.

Zum Gewinn ihrer Nahrung werden die abgeschnittenen Blattstücke in besondere Kammern (= *Pilzkammern*) ihrer Erdnester getragen. Durch Zerkauen des Materials und Düngung mit Kot wird ein guter Nährboden hergestellt, auf dem sich ein üppiges Pilzwachstum entwickelt. Die hochspezifischen, symbiontischen Pilze gehören zu den Ständerpilzen (*Leucocoprinus*- und *Lepiota*-Arten der Blätterpilze). Die Pilzhyphen werden ständig gesäubert und beschnitten; dadurch bilden sich keine Fruchtkörper, aber die Enden der Pilzfäden schwellen an (Kohlrabibildung = Bromatien, Abbildung 15). Diese eiweißhaltigen Verdickungen werden von den Ameisen abgeerntet und als Hauptnahrungsquelle genutzt. Die Pilze sind für die Blattschneiderameisen so wichtig, daß die ausschwärmende Königin auf ihrem Hochzeitsflug etwas Pilzgeflecht als «Saatgut» in besonderen Schlundtaschen zur neuen Nestgründung mitnimmt.

Der Vorteil dieses Zusammenlebens für die Pilze liegt darin, daß ihnen durch die Zerkleinerung des Pflanzenmaterials

die Verwertung wesentlich erleichtert wird. Die Ameisen haben den Vorteil, daß ihnen die pflanzliche Cellulose, die sie selbst nicht aufschließen können, durch die Pilze in eine verwertbare Form umgewandelt wird; außerdem zerstören die Pilze organische Stoffe, die die Pflanzen in ihren Blättern zur Abwehr von Insekten enthalten.

Die Ameisen tragen an speziell angepaßten Regionen der Körperoberfläche, zum Beispiel auf der Cuticula an der Brustseite, auch eine Ansammlung fädiger Bakterien (Streptomyceten), die Antibiotika bilden und dadurch zum Schutz vor unerwünschten Pilz-Schmarotzern dienen. Die gefährlichsten Parasiten sind hochvirulente Schlauchpilze (*Escovopsis aspergilloides*, *Escovopsis weberi*), die bisher nur in Ameisennestern gefunden wurden und spezifisch durch die Streptomyceten-Antibiotika am Wachstum gehindert werden. Die Nahrungspilze werden dagegen durch diese Antibiotika in ihrem Wachstum gefördert. Die Königin nimmt die Streptomyceten in gleicher Weise wie die Pilzsymbionten auf ihren Hochzeitsflug mit.

In einem vier Jahre alten Nest der Blattschneiderameisen wurden über 1000 Kammern gefunden, von denen 390 Pilzgärten enthielten. Die Kolonien der *Atta*-Arten können bis zu acht Millionen Individuen umfassen; das entspricht der Biomasse einer ausgewachsenen Kuh, und auch der Verbrauch an «Grünfutter» entspricht etwa dem Tagesbedarf eines Rindes.

Lange Zeit blieb die Bedeutung des Einsammelns der Blattstücke durch die Ameisen im verborgenen. Anfangs nahm man an, daß das Pflanzenmaterial direkt als Futter dient. Der englische Forscher Henry Walter Bates (1825–1892), der Mitte des 18. Jahrhunderts den Amazonas bereiste, glaubte dagegen, daß mit den Blättern die Eingänge der Ameisennester zugedeckt werden, um die Brut zu schützen. Erst 1874 wurde die Bedeutung der Pilze erkannt. Thomas Belt schrieb (in freier Übersetzung):

Ich glaube, daß die Ameisen die Blätter als eine Art Dung oder Mist verwenden, auf dem ein kleiner Pilz wächst, von dem sie sich ernähren; sie sind also tatsächlich Pilzzüchter und Pilzesser.

Pilzgärten der Termiten.

Während die Blattschneiderameisen typisch für die tropischen Regionen der Neuen Welt sind, fallen in der Alten Welt (Afrika und Asien) die riesigen Bauten der «Höheren» Termiten auf, zum Beispiel der Arten *Macrotermes bellicosus*, *Acanthotermes acanthothorax* und *Odontotermes latericus*). Termiten sind Holzzerstörer, und da sie dem Holz ein Ende bereiten, wurden sie von den Römern als «Termes» bezeichnet. Durch ihre Ernährung von totem Holz, Laub und anderem Pflanzenmaterial tragen sie auch entscheidend zur Humusbildung in der Natur bei. Die «Niederen», holzverwertenden Termiten enthalten zum Aufschluß der für sie unverdaubaren Nahrung in ihrem Verdauungstrakt Gärkammern mit Geißeltierchen (Protozoen) als Symbionten. Im Gegensatz dazu legen die «Höheren» Termiten in ihren unterirdischen Nestern auf Holzbrei eine ähnliche Pilzzucht an wie die Blattschneiderameisen. Auch sie ernähren sich von den kultivierten Pilzfäden und schließen somit indirekt das Holz auf, das sie ohne diese Symbiose nicht verwerten könnten. Als Nahrung nehmen die Arbeiterinnen Gras, Rinde, totes Holz und unverdautes Material von Fäkalien anderer Tiere auf, das verschluckt, aber nahezu unverdaut in die Nester eingebracht wird. Der Kot wird im Inneren des Baus ausgeschieden und zu Komposthaufen aufgeschichtet. Die symbiontischen Pilze wachsen auf diesen Kotkügelchen, die den Verdauungstrakt der Termiten durchlaufen haben. Teile des Pilzmycels nutzen die Termiten als eine vitaminreiche und eiweißhaltige Nahrung. Die jungen Arbeiter holen laufend die weißen

Pilzköpfchen und füttern damit den Nachwuchs, die Königin und ihren Gemahl sowie die Soldaten, die nicht mehr selber Nahrung aufnehmen können.

Die Termitenpilze, Gattung *Termitomyces*, gehören zu den ritterlingsartigen Blätterpilzen (Familie Tricholomataceae). Die Art *Termitomyces titanicus* ist der bisher größte bekannte Blätterpilz; sein Hut hat einen Durchmesser, der ein Meter betragen kann. Andere Arten (zum Beispiel *Termitomyces microcarpus*) haben einen Hut, der kaum zwei Zentimeter erreicht. Die Fruchtkörper an der Erdoberfläche entstehen an Hyphen, die bis in die Pilzkammern reichen.

Die Termitenpilze, die nach einem Regenguß in der Nähe der Termitenbauten aus dem Boden sprießen, finden sich bei den Bewohnern dieser Gegend, zum Beispiel in Namibia, neben den üblichen Gerichten (Krokodil und Antilopenfleisch sowie Trüffelpilzen) auch auf dem Speiseplan.

Viele dieser Termiten bauen riesige kaminartige, betonfeste Hügel, die 5 bis 7 Meter in die Höhe ragen. Bemerkenswert ist das Lüftungssystem in den Bauten, das die verbrauchte Luft durch Lüftungsrohren abführt und frische Luft einströmen läßt. Dieses ausgeklügelte Belüftungssystem ist wegen der Größe der Termitenvölker, oft mehrere Millionen Tiere, notwendig, da durch ihre Atmung sowie den Energiestoffwechsel der Pilze und anderer Mikroorganismen ein hoher Sauerstoffverbrauch stattfindet.

Ein Zusammenleben und eine Züchtung von Pilzen (*Ambrosiazucht*) ist auch bei den Borkenkäfer-Arten (*Ipidae*) und einigen anderen holzbewohnenden Insekten, wie Werftkäfern (*Lymexilidae*) und Holzwespen (Siricidae), zu finden.

Eine Pilzzucht wurde vor kurzem auch bei einer amerikanischen Strandschnecke beobachtet (*Littoria orrorata*). Die Schnecke knabbert Gräser an und bedeckt die Wunde mit ihren Kotkügelchen. Dadurch verschafft sie bestimmten Pilzen gute Wachstumsbedingungen. Später kehrt die Schnecke zurück und verspeist nun die Pilze.

Endosymbiose von Pilzen mit Insekten.

Neben den Symbiosen, bei denen die Symbiosepartner getrennt leben, sind auch Endosymbiosen von Mikroorganismen mit Insekten weit verbreitet, in denen die Symbionten im Wirt leben. Man findet diese Symbiosen bei Insekten, die sich einseitig ernähren. Hauptfunktion der Endosymbionten sind wieder die Synthese und Bereitstellung von Stoffen, die diese Insekten zur Entwicklung benötigen, und ein Aufschluß der Nahrung.

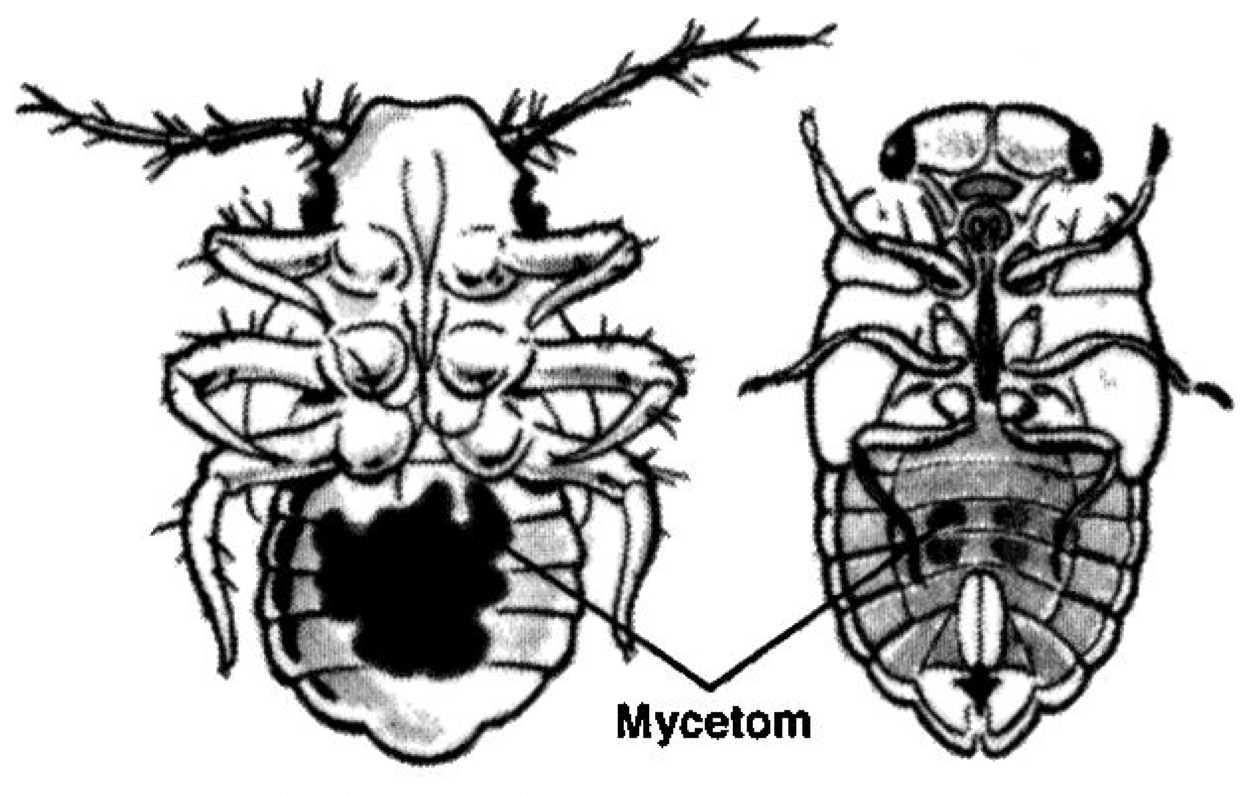


Abbildung 16: Mycetome mit Pilzsymbionten bei pflanzensaftsaugenden Blattflöhen (*Psylla*) und manchen Zikaden (*Hemiodoecus*)

Die pilzlichen Endosymbionten sind in speziellen Zellen der Insekten, den *Mycetocyten*, eingeschlossen. Die Mycetocyten können sich zu größeren Komplexen zusammenschließen, so daß eigene Symbiose-Organe

(*Mycetome*) in der Leibeshöhle auftreten (Abbildung 16). Die Mycetome (oder Pilzorgane) können in Einzahl oder Mehrzahl vorhanden sein. Typische Mycetome entwickeln sich bei blutsaugenden Insekten sowie den saugenden Pflanzenläusen. Die Symbionten, Hefen oder Bakterien, liefern beispielsweise ihren parasitischen Wirten, die sich ausschließlich von Blut oder Pflanzensaft ernähren, Enzyme, Vitamine oder lebenswichtige Aminosäuren, die in der Nahrung fehlen.

Die überragende Bedeutung dieser Symbiose für viele Insekten zeigt sich deutlich, wenn der Symbiont künstlich aus dem Wirt entfernt wird (zum Beispiel durch Sterilisation der Eioberfläche, Hitzebehandlung, Antibiotikagaben oder Operation der Mycetome). Alle Versuche ergaben, daß die symbiontenfreien Tiere in ihrer Entwicklung schwer geschädigt waren. In einigen Fällen wurde die Weiterentwicklung verzögert oder vorzeitig eingestellt, und die Tiere starben ab, ohne das Erwachsenenstadium erreicht zu haben. Teilweise konnte auch eine Schädigung oder ein vollständiger Verlust der weiblichen Fortpflanzungsorgane beobachtet werden.

In vielen Experimenten war es möglich, durch Zugabe von Vitaminen (besonders der B-Gruppe) und/oder einiger lebensnotwendiger (essentieller) Aminosäuren die Endosymbionten zu ersetzen und eine normale Entwicklung der Insekten zu erhalten.

5. Pilze als Nahrung und zur Heilung

Speisepilze

Der Anblick eines kräftigen Steinpilzes im Moos oder einer Gruppe sattgelber Pfifferlinge läßt das Herz jedes Pilzsammlers höher schlagen. Neben diesen beiden auch Städtern bekannten Arten, gibt es eine große Zahl anderer Wald- und Wiesenpilze, die unsere Tafel bereichern können.

Pilze dienten schon in uralten Zeiten den Menschen als Nahrung, Heilmittel, oder sie wurden für verschiedene andere Zwecke verwendet. So sind Pilze auch in Mitteleuropa von unseren Vorfahren genutzt worden. In steinzeitlichen, mehr als 3000 Jahre alten Funden aus schweizerischen Pfahlbausiedlungen befanden sich Reste von Zunderschwämmen (*Fomes fomentarius*); ihr Fruchtkörper enthält eine leicht entzündliche Faserschicht, die besonders gut zum Feuermachen geeignet ist.

In der Antike wurden Pilze als Köstlichkeiten des Waldes angesehen und in verschiedenen Schriften beschrieben. Die Römer schätzten Pilze gleichfalls sehr hoch ein, wie sich an einem Epigramm von Marcus Valerius aus dem 1. Jahrhundert nach Christus erkennen läßt. In freier Übersetzung heißt es:

> *Silber und Gold, Mantel und Toga kann man leicht verschenken, schwer aber ist es, auf Pilze zu verzichten.*

Die große Vorliebe für Pilze hat sich immer noch bei den Nachfahren der Römer erhalten. Jedes Jahr werden beispielsweise tonnenweise Steinpilze aus Finnland nach Italien exportiert.

Die Königin der Speisepilze ist die Trüffel, die bereits in der Antike als Delikatesse geschätzt wurde. Theophrast (371–287 vor Christus) erwähnt in seinen Schriften den «vorzüglichen Geschmack» und ihr Wachstum in der Erde. In alten Kräuterbüchern, beispielsweise bei H. Bock (1539), werden sie

als roh und gekocht eßbare, runde, wurzel-, blatt- und stengellose Pflanzen beschrieben.

Trüffeln (Tuber) sind kartoffelähnliche Fruchtkörper von Schlauchpilzen, die sich einige Zentimeter tief im Erdreich entwickeln. Die besten Trüffeln kommen aus Norditalien und Südfrankreich: die Weiße Trüffel (*Tuber magnatum* [Pico.], Tartufo bianco) aus dem Piemont und die Schwarze Trüffel (*Tuber melanosporum* [Vitt.], Tartufo nero) aus dem Périgord. Ein Kilogramm Alba-Trüffeln aus dem Piemont hat einen Wert von 2000–3000 Euro, in schlechten Erntejahren sogar von 4000–5000 Euro. Dieser hohe Verkaufspreis ist durch das geringe Angebot bedingt und dadurch, daß Trüffeln ihre Fruchtkörper nur in einer Mykorrhiza mit einigen Laubbäumen bilden. Wegen des hohen Preises lohnt es sich, das Mycel in Kultur vorzuziehen und dann an den Wurzeln der Wirtsbäume, etwa von Eichen, weiterwachsen zu lassen.

Die Verbreitung der Trüffelsporen erfolgt nicht wie bei den meisten anderen Höheren Pilzen durch den Wind. Die Fruchtkörper zersetzen sich, und die Sporen verbleiben gleich im Boden, oder die Fruchtkörper werden von Tieren ausgegraben und gefressen. Die Sporen durchwandern den Darmtrakt, ohne Schaden zu erleiden, und können sich so, gut gedüngt, verbreiten.

Eine Besonderheit der Trüffeln ist ihr Aroma und ihr Duft. Die wichtigste Duftkomponente ist ein alpha-Androstenol, ein Steroid, das junge weibliche Schweine sehr attraktiv finden, da es als Sexuallockstoff (Pheromon) wirksam ist. Für Schweine und Hunde sind die Duftstoffe so intensiv, daß sie Trüffeln noch aus einer Entfernung von über 50 Metern wittern. So sieht man von Oktober bis Januar morgens Besitzer mit Sauen, heute immer öfter mit Hunden, auf «Beutezug» in den Trüffelwäldern.

Es wird angenommen, daß die Duftstoffe, das alpha-Androstenol und ähnliche Steroide, beim Menschen als Aphrodisiakum wirken; aus diesem Grund werden diese Stoffe auch Kosmetika zugesetzt.

Trüffeln und die anderen Wildpilze schmecken nicht nur gut, sie zeichnen sich auch durch den Gehalt an wertvollen Nährstoffen sowie an stärkenden und lebenswichtigen Inhaltsstoffen, zum

Beispiel Vitaminen, aus. So enthält der Zuchtchampignon etwa 0,1 Milligramm Vitamin B_1, 0,4 Milligramm B_2, 4 Milligramm Vitamin C und 5 Milligramm Niacin. Außerdem besitzen sie einen hohen Gehalt an Mineral- und Ballaststoffen. Sie sind auch, was heute besonders wichtig erscheint, fett- und kalorienarm, so daß sie immer häufiger in Diäten verwendet werden (Tabelle 1).

Pilze sind jedoch wegen ihres Chitingehalts schwer verdaulich. Es kann daher bei einem übermäßigen Genuß zu Magenbeschwerden kommen. Auch speichern Pilze in hohem Maße schädliche Schwermetalle (siehe Kapitel 6).

Tabelle 1: Zusammensetzung von Champignon, Steinpilz und Kartoffel (Durchschnittswerte in %)

	Wasser	Eiweiß	Fett	Kohlenhydrate	Rohfaser	Mineralien
Champignon	90,0	2,7	0,2	3,5	1,0	1,0
Kartoffel	75,0	2,0	0,1	21,0	1,0	1,0
Steinpilz	88,6	2,8	0,4	4,1	1,0	0,8

Zur Pilzzucht eignen sich nur Ständerpilze, da (im Gegensatz zu den Schlauchpilzen) ihr zweikerniges (dikaryotisches) Mycel fortlaufend jedes Jahr neue Fruchtkörper bilden kann. Doch dürfen die Pilze zur Fruchtkörperbildung nicht auf eine Mykorrhiza mit Waldbäumen angewiesen sein. Es kann daher nur eine begrenzte Anzahl von guten Speisepilzen oder von Heilpilzen erfolgreich kultiviert werden. Wichtige gezüchtete Speisepilze sind Champignon (*Agaricus bisporus*), Judasohr (*Auricularia auricula-judae*), Austernpilz (Kalbfleischpilz, *Pleurotus ostreatus*), Braunkappe (*Stropharia rugosoannulata*), Shiitake (*Lentinula edodes*) und Stockschwämmchen (*Kuehneromyces mutabilis*). Weitere schmackhafte Kulturpilze sind Goldkäppchen (Nameko-Pilz, *Pholiota nameko*), Limonenseitling (Zitronenseitling, *Pleurotus citrinopileatus*), Kräuterseitling (*Pleurotus eryngii*), Igelstachelbart (Affenkopfpilz, Pom Pom blanc, *Hericium erinaceus*), Samtfußrübling (Enoki-Pilz, *Flammulina velutipes*).

Zubereitete Speisepilze lassen sich, entgegen einer weitverbreiteten Ansicht, 1–2 Tage im Kühlschrank aufbewahren,

sie sollten aber vor dem Verzehr auf über 70 °C erwärmt werden.

Heilpilze

Überlieferungen aus China belegen, daß Pilze in der Medizin verwendet wurden, lange bevor darüber schriftliche Aufzeichnungen erfolgten. Auch heute spielen Heilpilze in der ostasiatischen Medizin eine überragende Rolle, und auch die moderne Wissenschaft befaßt sich immer stärker mit ihren Inhaltsstoffen. So werden die alten Erfahrungen der Volksmedizin neu ausgewertet und wissenschaftlich untersucht. In Europa sind wahrscheinlich auch schon in vorgeschichtlichen Zeiten Pilze zu Heilzwecken genutzt worden. In einem Alpengletscher wurde vor einigen Jahren eine etwa 5300 Jahre alte Mumie gefunden, «Ötzi» genannt; unter seinen Sachen befand sich auch eine Schnur mit getrockneten Birkenporlingen (*Piptoporus betulinus*). Möglicherweise dienten ihm diese Pilze zur Wundbehandlung, da diese Porlinge schmerzstillende und desinfizierende Substanzen enthalten.

In der Antike wurde der Lärchenporling (*Laricifomes officinalis* = *Agaricus*) als Allheilmittel angesehen. Plinius der Ältere (23/24–79 nach Christus) gibt über 15 Fälle an, bei denen dieser Baumschwamm nützlich sein kann. So erwähnt er die Behandlung bei einem Biß von Spinnen und Skorpionen, bei Tuberkulose, gegen Gelbsucht, gegen Wassersucht, bei einer Magenverstimmung und als Abführmittel. Heute wird der Pilz beispielsweise noch zur Behandlung von Blasensteinen, Husten, Magenkrämpfen und Nierenentzündungen empfohlen.

In der asiatischen Naturheilkunde schätzt man besonders den Glänzenden Lackporling (*Ganoderma lucidum*), den Shiitake-Pilz (*Lentinula edodes*) und den Chinesischen Raupenpilz (*Cordyceps sinensis*, eine Kernkeule); ihnen werden vielfältige gesundheitsfördernde Wirkungen zugeschrieben.

Der auf Holz von Buche, Birke und anderen Laubbäumen kultivierbare Glänzende Lackporling heißt in Japan «Reishi», in China «ling zhi» oder «ling chih», was «magische Pflanze» oder «Pflanze der Unsterblichkeit» bedeutet; diese Benennung weist

darauf hin, daß er die Lebenserwartung erhöhen soll. Der Kult, diesen Pilz zur Verlängerung des Lebens anzuwenden, wurde etwa im 3. Jahrhundert vor Christus in China entwickelt. Außerdem wird dem Glänzenden Lackporling eine heilende Wirkung bei Schlaflosigkeit, Asthma, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Haarschwund und bei einer Reihe weiterer Erkrankungen zugeschrieben. Wissenschaftlich konnte bestätigt werden, daß er die Abwehrkräfte stärkt.

Da bereits der junge Lackporling verholzt, wird er getrocknet, gemahlen und das Pulver zu Tee oder zu anderen Flüssigkeiten gegeben.

Der Shiitake-Pilz ist neben dem Kulturchampignon und dem Austernseitling der meistangebaute Pilz der Welt. Die Weltproduktion des Champignons beträgt etwa 1,8 Millionen Tonnen, die des Shiitake über 800 000 Tonnen. Die Kultur erfolgt auf Holz von Buche, Eiche oder Kastanie. Die ersten Aufzeichnungen über seine Heilwirkung sind aus der Zeit der Ming-Dynastie (1368–1644) bekannt. Shiitake soll allgemein die Widerstandskraft gegen Krankheiten erhöhen und Altersbeschwerden Vorbeugen. Besonders interessant ist der klinische Nachweis, daß bei einem regelmäßigen Verzehr die Blutfette, besonders das schädliche LDL-Cholesterin, gesenkt werden können, so daß sich Ablagerungen von Fetten und Cholesterin in den Adern verhindern lassen und somit einem Herzinfarkt vorgebeugt wird. Shiitake enthält auch viele Mineralstoffe (zum Beispiel Zink) und Vitamine der B-Gruppe, die für die Gesundheit förderlich sind.

Der Chinesische Raupenpilz (Dong Chong Xia Cao, Hia-Tsao-Tung-Chung, japanisch Tochukaso) ist ein Schlauchpilz, der unterirdisch auf Puppen und Raupen einer Schmetterlingsfamilie parasitiert.

Abbildung 17: Wachstum von *Cordyceps sinensis*, eine Kernkeule, auf einer Schmetterlingsraupe



Bei der Reife wächst der gestielte, keulenförmige Fruchtkörper zur Erdoberfläche (Abbildung 17). Er hat in China seit Jahrhunderten eine überragende Bedeutung in der traditionellen Medizin und zur Nahrungsergänzung, besonders zur Stärkung geschwächter älterer Menschen. Im Westen wurde man erst 1993 auf den Raupenpilz aufmerksam, als zuvor unbekannte Sportlerinnen des chinesischen Nationalteams während der Olympiade und bei anderen Sportfesten einige Lauf-Weltrekorde brachen.

Es ließ sich bei den Sportlerinnen keine Einnahme von Dopingmitteln nachweisen, aber es wurde bekannt, daß ihre

Diät mit diesem Pilz ergänzt wurde. Wissenschaftlich konnte bestätigt werden, daß die Wirkstoffe des Raupenpilzes die Körperkraft und Ausdauer durch eine Verbesserung des Energiestoffwechsels erhöhen und sich sportliche und andere Leistungen deutlich steigern lassen. Der Pilz soll außerdem die körperlichen Abwehrkräfte stärken und die Heilung einer Vielzahl von Krankheiten beschleunigen.

Die ursprünglichen, medizinisch wirksamsten Stämme wurden überwiegend auf der tibetanischen Qinghai-Hochfläche (3500–6000 Meter) und anderen Hochflächen in China und Nepal gefunden, so daß der Erwerb des Pilzes außerordentlich teuer war. Heute werden auch noch Wildpilze gesammelt; außerdem wird jedoch das Pilzmycel, das von einem früheren Wildstamm abstammt, biotechnologisch unter definierten Bedingungen kultiviert. Die aus dem Mycel gewonnenen Wirkstoffe werden dann als Pulver oder in Kapselform zur Verbesserung der Lebensqualität kommerziell angeboten.

Tabelle 2: Einige Heilpilze und ihre Anwendung in der Volksmedizin oder traditionellen fernöstlichen Medizin

Name	Wissenschaftlicher Name	Anwendung oder Wirkung (kleine Auswahl)
Glänzender Lackporling (Reishi, Ling zhi)	*Ganoderma lucidum*	Bei chronischer Gelbsucht, zur Senkung eines hohen Blutdrucks, bei Asthma und Bronchitis (siehe Text)
Shiitake	*Lentinula edodes*	Bei Erkältung und Lungenentzündung, bei Schwächezuständen (siehe Text)
Honiggelber Hallimasch	*Armillaria mellea*	Förderung der Durchblutung, gegen Schwindelanfälle

Name	Wissenschaftlicher Name	Anwendung oder Wirkung (kleine Auswahl)
Eichhase	*Grifolia umbellata* [= *Polyporus umbellatus*]	Zur Senkung hohen Blutdrucks, bei Diabetes, bei Erschöpfung
Chinesischer Raupenpilz (Dong Chong Xia Cao)	*Cordyceps sinensis*	Zur Stärkung des Immunsystems und der Leistung, zur Reduktion der Blutfettwerte (siehe Text)
Klapperschwamm (Maitake)	*Grifola frondosa*	Immunstärkende Wirkung
Chinesische Morchel (Muh Ehr, Judasohr)	*Auricularia auricula-judae*	Bei Bluthochdruck, zur Senkung des Cholesteringehalts
Schiefer Schillerporling	*Inonotus obliquus*	Zur Blutreinigung, als Kräftigungsmittel
Spaltblättling	*Schizophyllum commune*	Gegen gynäkologische Erkrankungen
Schmetterlingsporling	*Trametes versicolor*	Immunstärkende Wirkung
Lärchenporling	*Laricifomes officinalis*	Zur Blutstillung, als Abführmittel (siehe Text)
Zunderschwamm	*Fomes fomentarius*	Gegen Magenverstimmung

Im Jahre 1989 wurde von dem Amerikaner S. G. Jong und seinem chinesischen Kollegen Q. Y. Yang eine Liste von 105 Pilz-Arten aufgestellt, die in der traditionellen chinesischen Medizin Verwendung finden. Einige wichtige Arten und einige wenige Beispiele ihrer Anwendung oder möglichen Wirkungsweisen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Oft wird bei den Heilpilzen eine tumorhemmende Wirkung angegeben; dafür gibt es aber bisher keinen überzeugenden wissenschaftlichen Nachweis.

Kombucha oder der «Teepilz»

Ein besonderes Heilgetränk ist der sogenannte «Teepilz», ein alkoholhaltiges Getränk, bei dem schwarzer Tee als Grundsubstanz dient. Auf der Oberfläche des Getränks bildet sich der «Teepilz» als eine schwammige, gallertartige, schleimige Haut aus; es ist eine enge Lebensgemeinschaft von Essigsäurebakterien und verschiedenen Hefen, beispielsweise dem Essigsäurebakterium *Acetobacter xylinum* und den Hefen *Schizosaccharomyces pombe*, *Saccharomycodes ludwigii* und *Pichia fermentans*.

Zur Herstellung des Getränks wird dem Tee Zucker zugesetzt, der von den Mikroorganismen zum Wachstum genutzt wird. Dabei entstehen Ethanol (unter 1 %), Kohlendioxid, Essigsäure (3–4 %) und geringe Mengen anderer organischer Säuren, zum Beispiel Milchsäure, Weinsäure, Bernsteinsäure.

Im fertigen, vergorenen «Teepilz»-Getränk sind noch unvergorener Zucker (Glucose, Fructose), Ascorbinsäure (Vitamin C), weitere Vitamine und eine Reihe verschiedener Enzyme enthalten.

Kombucha wurde schon vor über 2000 Jahren in China als Volksheilmittel mit schwarzem oder grünem Tee zubereitet, in Japan war es ursprünglich ein Tee mit Algen als Grundsubstanz. Das «Teepilz»-Getränk soll ein Heilmittel gegen Unpäßlichkeiten bis zu schweren Erkrankungen sein. Es wird zur Entgiftung und Entschlackung des Körpers eingesetzt, soll die Harnausscheidung verstärken sowie bei Gicht, Darmträgheit und Steinleiden helfen. Es soll auch die körperliche Leistungsfähigkeit erhöhen sowie gegen Müdigkeit und Konzentrationsschwäche wirken. Wahrscheinlich war es aus diesem Grund früher bei Studenten sehr beliebt.

Auch wenn die therapeutische oder gesundheitsfördernde Wirkung wissenschaftlich nicht nachgewiesen und sogar bestritten wird, bleibt der «Teepilz» (je nach Kulturzeit) ein angenehmes, säuerlich-fruchtiges und erfrischendes Getränk.

Es gibt aber auch Warnungen vor selbsthergestelltem «Teepilz», da bei unsachgemäßem Ansetzen immer die Gefahr einer Verunreinigung mit gefährlichen Schimmelpilzen oder (bei

einer zu langsamen Säurebildung) sogar eine Anreicherung mit pathogenen Bakterien besteht.

6. Giftpilze und Pilze als Schadstoffspeicher

Die Giftigkeit einiger Pilze ist den Menschen schon seit Jahrtausenden bekannt. In der Antike wurde beispielsweise angenommen, daß Pilze giftig werden, wenn sie in der Nähe von giftigen Pflanzen wachsen oder wenn sie von giftigen Schlangen angehaucht werden.

Giftpilze wurden bewußt als Rauschmittel oder auch als Mordwaffe genutzt. Nach Literaturangaben soll der römische Kaiser Claudius im Jahre 54 nach Christus von seiner Frau mit Pilzen vergiftet worden sein. Wahrscheinlich bestand das verhängnisvolle Gericht aus ungiftigen Kaiserlingen (*Amanita caesarea*), dem aber Gift aus Knollenblätterpilzen zugesetzt worden war. Ein weiterer Aufsehen erregender Mordfall hat sich 1993 in der Schweiz ereignet, wo eine Frau mit ihrem Freund den Ehemann durch Injektion eines Preßsaftes aus Grünen Knollenblätterpilzen umgebracht haben soll.

Von den 5000 mitteleuropäischen Pilzen sind nur etwa 150 als Giftpilze erkannt. Der gefährlichste Giftpilz in Europa ist der Grüne Knollenblätterpilz (*Amanita phalloides*), auf den die meisten Todesfälle zurückgehen (circa 90 %). Der junge Pilz wird von Laien leicht mit dem Wald-Champignon verwechselt. Für einen Erwachsenen sind circa 50 Gramm des frischen Pilzes bereits tödlich. Die wirksamen Giftstoffe sind die Amatoxine (zum Beispiel alpha-Amatinin). Die Gifte schädigen besonders Niere und Leber, wo sie im Zellkern die Synthese von bestimmten Nucleinsäuren (mRNS) und somit die lebensnotwendige Bildung von Eiweißstoffen verhindern. Charakteristisch ist die lange Latenzzeit von mehreren Stunden bis Tagen, ehe die Vergiftungssymptome auftreten. Dann ist die Giftschädigung schon so weit fortgeschritten, daß keine Heilung mehr möglich ist.

Ein weiterer wichtiger Giftpilz in Mitteleuropa, dessen Giftigkeit erst 1957 erkannt wurde, ist der Orangefuchsige Rauhkopf (*Cortinarius orellanus*). Da er keinem der üblichen Speisepilze ähnlich sieht, kam es bisher durch ihn nur vereinzelt zu Todesfällen. Die Vergiftung mit diesem Pilz macht sich erst nach einigen Tagen bis zwei Wochen nach dem Verzehr bemerkbar. Das Gift zerstört die Nieren, so daß es zu einem Nierenversagen und zum Tod kommt.

Zu den Pilzen, die in Pilzbüchern bis vor einigen Jahren noch als Speisepilze aufgeführt wurden, gehört die Frühjahrslorchel (*Gyromitra esculenta*). Ihre Giftstoffe (zum Beispiel Gyromitrin) besitzen eine ähnliche Wirkungsweise wie die Gifte des Grünen Knollenblätterpilzes. Sie werden durch 5–15minütiges Vorkochen teilweise zerstört. Es können trotzdem schwere Vergiftungen und Todesfälle durch einen Zusammenbruch des Kreislaufs auftreten. Sehr gefährlich sind auch die Gifte des Kahlen Kremplings (*Paxillus involutus*), früher ein bekannter Speisepilz. Nach wiederholtem Genuß treten manchmal Schweißausbrüche, Übelkeit und Sehstörungen auf. In schweren Fällen findet eine Zerstörung der roten Blutkörperchen statt. Es kommt zu einem Nierenversagen oder sogar zum tödlichen Schock. Der Grünling (Echter Ritterling, *Tricholoma equestre*), ein früher beliebter Speisepilz, scheint gleichfalls unter bestimmten Bedingungen schwere Vergiftungen zu verursachen.

Schwerste, epidemisch auftretende Vergiftungen mit unzähligen Verstümmelten und Toten wurden besonders im Mittelalter durch den Mutterkornpilz verursacht (siehe Kapitel 11, Pflanzenkrankheiten).

Die Gesundheit kann nicht nur durch die pilzeigenen Giftstoffe, sondern auch durch einen hohen Schwermetallgehalt in Wildpilzen beeinträchtigt werden. Zuchtpilze enthalten dagegen kaum Schwermetalle.

Bemerkenswert ist die selektive Aufnahme von Metallverbindungen durch das Erdmycel der verschiedenen

Pilze. Steinpilze speichern bevorzugt Bleiverbindungen, Wald-Champignons lagern besonders Cadmium und Quecksilber ein, und der Maronenröhrling (*Xerocomus badius*) speichert in hohem Maße Caesium. So lagen in einigen Gegenden 17 Jahre nach dem Reaktorunglück von Tschernobyl (1986) die Werte für radioaktives Caesium (Cs-137) immer noch deutlich über den Toleranzwerten (600 Becquerel/Kilogramm Pilz-Frischgewicht). Es wird an einigen Orten, auch in Deutschland, immer noch davor gewarnt, Maronenröhrlinge zu verzehren. Allgemein wird empfohlen, daß wegen der Belastung mit Schwermetallen und radioaktiven Verbindungen Erwachsene höchstens 250 Gramm Wildpilze pro Woche essen sollten. Schwangeren und Stillenden wird geraten, keine Wildpilze zu verzehren. In den letzten Jahren wurde sogar im Fleisch von Wildschweinen aus bestimmten Gebieten eine erhöhte Radioaktivität (hauptsächlich von Cs-137) nachgewiesen. In diesen Fällen hatten die Tiere wahrscheinlich mit ihrer Nahrung verseuchte Pilze und Wurzeln aufgenommen.

7. Zauberpilze – «Die kleinen Blumen der Götter»

Die Einnahme von Rauschmitteln war in der Menschheitsgeschichte meist mit Magie und Religion verbunden. Zu diesen Drogen, die das menschliche Bewußtsein erweitern können, gehören auch viele Pilzstoffe. In einer Reihe von Überlieferungen läßt sich erkennen, daß psychoaktive Substanzen schon seit Jahrtausenden bei verschiedenen Naturvölkern in magischen oder religiös-kultischen Handlungen eine überragende Rolle spielten.

In Nordafrika entdeckte Felsmalereien aus der späten Steinzeit (um 9000–6000 vor Christus) zeigen Wesen mit pilzförmigen Köpfen und andere Gestalten, die als Pilzgeister oder Menschen in Pilzekstase gedeutet werden.

Nordasiatische und nordamerikanische Medizinleute und Schamanen verwendeten Pilze, um Kontakt mit dem «Überirdischen» zu erreichen.

Zu den ältesten Drogen, die für religiöse Zeremonien genutzt wurden, gehört der Fliegenpilz (*Amanita muscaria*), der auch als «Glückspilz» bekannt ist.

Viele Völker in Nordasien verwendeten diesen Pilz bereits in vorgeschichtlicher Zeit bei religiösen Handlungen, bei Zaubereien, in der Wahrsagekunst und als Rauschmittel. Besonders in Rußland und Sibirien scheint der Fliegenpilz bei kultischen Festen von größter Bedeutung gewesen zu sein. Er wurde auch bei festlichen Anlässen verzehrt, um die Stimmung zu erhöhen.

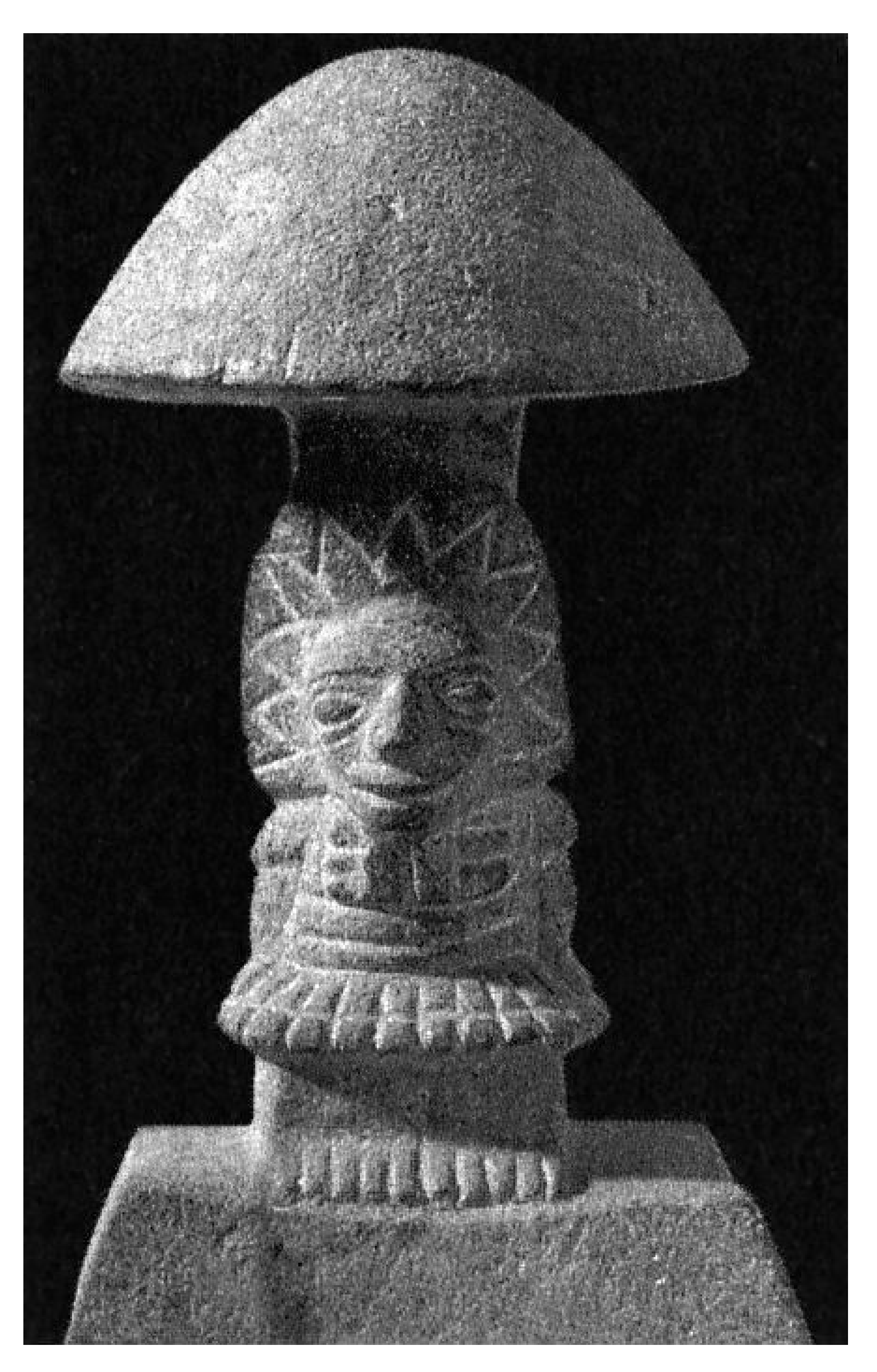
Es wird geschätzt, daß der Gebrauch von Fliegenpilzen in Sibirien bereits vor mehr als 6000 Jahren üblich war. Fliegenpilze wurden meist in getrocknetem Zustand verwendet. Es gibt auch Berichte, daß Stammesangehörige den Urin von in Trance befindlichen Schamanen auffingen und tranken. Da die Wirkung der Rauschstoffe beim

Verlassen des Körpers weitgehend erhalten bleibt, konnten sie sich auf diesem etwas ungewöhnlichen Wege gleichfalls in Ekstase versetzen.

Vermutlich ist auch der göttliche «Soma»-Trank in Altindien aus Fliegenpilzen bereitet worden. In einem Teil des ältesten schriftlichen religiösen Dokuments, der Rig-Veda (circa 1300 vor Christus), der um 2000 vor Christus nach Nordindien eingewanderten arischen Stämme (Ur-Indo-Iraner), wird von der Verehrung eines mystischen Trankes, der Soma, berichtet. Die Schrift enthält rituelle Lieder an das göttliche Geisteswesen Soma. In ihr wird Soma als Gott betrachtet und auch als heiliger Trank besungen, der als geweihter Vermittler zwischen den Menschen und der Welt des Übernatürlichen dient.

Für die berauschende Wirkung des Fliegenpilzes sind wahrscheinlich hauptsächlich die Alkaloide Ibotensäure und Muscimol (ein Derivat der Ibotensäure) verantwortlich. In geeigneter Konzentration verändern sie das Wahrnehmen der Umwelt, die Raum- und Zeitvorstellung sowie Sprache und Denken.

Abbildung 18: Kultischer «Pilzstein». Pilzsteine wurden im Hochland von Guatemala und in Mexiko gefunden.



In mexikanischen Chroniken aus dem 16. und 17. Jahrhundert gibt es bereits Hinweise auf die Verwendung halluzinogener Pilze für rituelle und profane Feste bei Indianern. Nach spanischen Schriftstellern (1829 und 1882) verwendeten Azteken und Mazateken in Mittel- und Südamerika bei rituellen Zeremonien von alters her Pilze,

um sich in rauschartige Zustände zu versetzen. Wahrscheinlich dienten auch Fliegenpilze den Inkas, Mayas und Azteken in der Neuen Welt als heilige Rauschpilze. Wie tief der Pilzkult bei den Indianern verwurzelt war, bezeugen «Pilzsteine», die im Hochland Guatemalas sowie im Süden und Westen Mexikos gefunden wurden (Abbildung 18).

Es wird angenommen, daß diese etwa 300 kleinen, meist etwa 30 Zentimeter hohen Steinfiguren mit schirmartigen Hüten etwa 500 vor Christus oder sogar früher entstanden sind. Anfangs wurden sie als Phallussymbole gedeutet. Nach neueren Untersuchungen stellen sie jedoch Pilzsymbole dar.

Erst 1953 konnte durch R. G. Wasson und seine Frau Valentina Pawlowna während ihrer Forschungsexpeditionen nach Mexiko bestätigt werden, daß die Eingeborenen Pilze als Rauschmittel in kultischen Zeremonien noch heute nutzen.

Sie gewannen das Vertrauen der Mazateken-Schamanin Marina Sabina, von der sie in den Gebrauch der heiligen Pilze eingeweiht wurden. In den Zeremonien dienten jedoch nicht Fliegenpilze, sondern andere Rauschpilze als Mittel zur Fürsprache mit den Göttern. Von größter Bedeutung waren die «Zauberpilze», von den mexikanischen Ureinwohnern «*Teonanacatl*» («Fleisch Gottes») genannt; es sind hauptsächlich Kahlköpfe (*Psilocybe*-Arten, Familie Strophariaceae), auch Samthäubchen (*Conocybe*-Arten, Familie Mistpilzartige Pilze) und Düngerlinge (*Panaeolus*-Arten, Familie Tintlingsartige Pilze).

Weltweit sind etwa 140 *Psilocybe*-Arten bekannt, davon haben circa 80 Arten eine halluzinogene Wirkung. Wichtigster Vertreter ist der «Mexikanische Zauberpilz» (*Psilocybe mexicana*). Er wächst in einer Höhe von 1350–1700 Meter, an Pfaden, auf feuchten Wiesen und Feldern sowie in Eichen- und Kiefernwäldern.

Auch in Europa sind etwa 10 halluzinogene Arten bekannt, zum Beispiel *Psilocybe cyanescens*, *Psilocybe semilanceata*, *Psilocybe fimetaria* und *Psilocybe pelliculosa*.

Abbildung 19: Chemische Formel des Indol-Alkaloids Psilocybin aus *Psilocybe*-Pilzen

Die «Psilos» enthalten die Indol-Alkaloide *Psilocybin* und *Psilocin* (Abbildung 19), die dem Serotonin, dem «Glückshormon» des Nervenstoffwechsels im Gehirn, ähnlich sind.

Die das Bewußtsein erweiternde Wirkung setzt 10 bis 60 Minuten nach der Einnahme der Pilze ein. Der Trip beginnt oft mit Lachanfällen. Danach entfaltet sich ein buntes Farbenspiel aus grünen oder rosafarbenen Nebelschleiern. Anschließend werden die Halluzinationen durch eine extrem gesteigerte Wahrnehmung abgelöst, dabei «*sehen die Augen schärfer, und die Ohren hören besser*».

Die Befunde über die psychoaktiven Pilze wurden von Wasson und seiner Frau am 13. Mai 1957 im Magazin *Life* veröffentlicht und erregten allgemein großes Aufsehen, das aber auch einschneidende negative Nebenwirkungen hatte. Die antibürgerlichen «Blumenkinder», immer auf der Suche nach neuen halluzinogenen Stoffen, hatten eine neue Quelle gefunden. So überschwemmten junge Leute auf der Suche nach Rauschpilzen auch die Hochtäler Mexikos und zerstörten dort durch ihren massenhaften Besuch manche zuvor friedliche Dorfstruktur.

Tabelle 3: Einige Arten, Vorkommen und wichtige nachgewiesene Wirkstoffe von Rauschpilzen

Amanita muscaria (Fliegenpilz;	Europa, Afrika, Asien, Amerika; Ibotensäure,	Muscimol, Muscazon)

Boletus manicus, *Boletus reayi* [Kuma-Pilze] (weltweit, Neuginea)

Claviceps purpurea (Mutterkornpilze; gemäßigte Zonen Europas, Nordafrika, Asien, Nordamerika; Mutterkornalkaloide [Lysergsäurederivate])

Heimiella angrieformis (Asien, Neuguinea)

Lycoperdon marginatum, *Lycoperdon mixtecorum* (Mexiko)

Copelandia cyanescens [= *Panaeolus cyanescens*] (warme Zonen beider Hemisphären, Bali; Psilocin, Psilocybin)

Russula agglutina (weit verbreitet, Neuguinea; Wirkstoffe ähnlich wie Fliegenpilz, Ibotensäure?, Muscimol?)

Mexikanische Rauschpilze:

«Teonanacatl» (Psilocybin, Psilocin)

Conocybe siligineoides (weltweit)

Panaeolus sphinctrinus (weltweit)

Psilocybe-Arten (weit verbreitet)

Stropharia cubensis [= *Psilocybe cubensis*] (sehr weit verbreitet)

Die Verwendung dieser «Magic Mushrooms» prägte seit den sechziger Jahren erst die Hippie-Bewegung und dann teilweise die Technoszene. In den Niederlanden und in einigen anderen Ländern ist der Anbau, Verkauf und Verzehr frischer Zauberpilze erlaubt, in Deutschland ist ihr Gebrauch dagegen verboten. In den Niederlanden stellten Händler diese Pilze als neue «Öko-Droge» dar, Läden schossen wie Pilze aus dem Boden – die sogenannten *Smart-*, *Coffee-* oder *Head Shops*, in denen auch Zauberpilze angeboten werden. Auch im Internet kann man heute problemlos «Zauberpilze» bestellen, hauptsächlich die bekannten mexikanischen Pilze

Stropharia cubensis und *Psilocybe fanaticus* sowie *Copelandia cyanescens*, einen Rauschpilz aus Hawaii.

Nach bisherigen Erkenntnissen ist mit diesen Pilzdrogen keine körperliche Abhängigkeit verbunden, und sie scheinen auch keinen körperlichen Schaden anzurichten, doch ähnlich wie bei LSD können sie verdrängte traumatische Erlebnisse aus dem Unterbewußtsein wieder hervorholen. Die Zusammensetzung der aktiven Inhaltsstoffe in Pilzen kann extrem schwanken, so daß sich die Wirkung kaum Vorhersagen läßt. Es sollte auch bedacht werden, daß die halluzinogene Wirkung abhängig vom Pilzstamm und den Bedingungen bei der Anzucht sehr unterschiedlich sein kann. Durch die Droge kann es zu einem Realitätsverlust mit ungewissem Ausgang kommen. Es können Angstzustände auftreten und Wahnvorstellungen ausgelöst werden. Vereinzelt wird berichtet, daß Dämonen im Zimmer erscheinen, denen man entfliehen möchte. Dadurch kam es bereits zu Stürzen aus dem Fenster, da man im Drogenrausch glaubt, fliegen zu können. Der Konsum dieser sogenannten «ökologischen Drogen» bleibt daher immer mit einem hohen Risiko verbunden, so daß wegen der unvorhersehbaren Auswirkungen und der möglichen schwerwiegenden Nebenwirkungen grundsätzlich vom Verzehr halluzinogener Stoffe abzuraten ist.

8. Pilze als Parasiten und Krankheitserreger von Mensch und Tier

Auf der Haut des Menschen lebt eine Vielzahl von Mikroorganismen, Milliarden von Bakterien, aber auch verschiedene Pilze. Normalerweise verursachen die Mikroorganismen keine Schädigungen. Unter bestimmten Bedingungen können jedoch verschiedene fädige und sprossende Pilze bei Tieren und beim Menschen eine Erkrankung (Mykose) verursachen. Von den tausenden Pilzarten sind aber nur etwa 180 Formen als Krankheitserreger bekannt. Meist erfolgt ein Befall an der Körperoberfläche, eine Besiedlung innerer Organe (zum Beispiel der Lunge) ist dagegen in unseren Breiten selten und findet normalerweise nur bei einer Grunderkrankung oder bei einer Schwächung der körpereigenen Abwehrkräfte statt.

Der erste Hinweis, daß Mikroorganismen Krankheiten bei Menschen verursachen können, erbrachte im Jahre 1837 R. Remak, der in den Krusten des *Favus* (Erbgrind), einer Erkrankung der behaarten Kopfhaut, «runde Körperchen und verzweigte Fäden» beobachtete. Zwei Jahre später erkannte J. L. Schönlein, daß es sich bei diesen Strukturen um Pilze handelt. In einem Selbstversuch bewies Remak (1842) den Zusammenhang zwischen dieser Kopfhauterkrankung und diesem Pilz, den er *Achorion schoenleinii* nannte (heute *Trichophyton schoenleinii*). In den folgenden Jahren wurden Pilze als Erreger von weiteren Erkrankungen der Haut, Schleimhaut, Haare und Nägel erkannt.

Fußpilze und andere Hautpilze

Weit verbreitet ist bei Menschen eine Infektion der Haut durch verschiedene Pilzarten. Es sind meist Hautpilze (Dermatophyten), hauptsächlich *Trichophyton rubrum*, *Trichophyton mentagrophytes* und *Epidermophyton floccosum*. Auch Hefen der Gattung *Candida* und andere Pilze können die Haut befallen. Die Hautpilze wachsen in den oberen Haut- und Hornschichten. Sie leben in den Hautschüppchen, wo sie sich von Schweiß und abgestorbenen Hautzellen (auch Keratin) ernähren. Durch winzige Risse dringen sie in die Haut ein; da sie aber keine höheren Temperaturen mögen, wachsen sie normalerweise nicht bis in tiefere Körperregionen.

Fußpilze, für deren Wachstum eine feuchte Umgebung günstig ist, lieben Schweißfüße und «Sportlerfüße». In der Umwelt ist besonders das feuchte Klima von Schwimmbädern für die Verbreitung günstig. Dort sind die Sporen häufig überall verteilt, auch wenn beste hygienische Maßnahmen durchgeführt werden. Die meist sehr gute Hygiene in Schwimmbädern kann dem Pilz wohl das Leben schwermachen, aber Infektionen nicht verhindern. Man sollte daher immer Badeschuhe tragen und Fußdesinfektionsduschen meiden (!), da sie gerade von Badegästen genutzt werden, die an Fußpilzen erkrankt sind, so daß in der Umgebung der Duschen besonders viele infizierte Hautschüppchen vorliegen; auch ist die Konzentration des Desinfektionsmittels oft zu gering und die Einwirkungszeit zu kurz. Es wird geschätzt, daß jeder dritte in Deutschland von Fußpilzen befallen ist und über 20 % der Bevölkerung darunter leiden.

Erste Anzeichen einer Pilz-Besiedlung sind neben einem Juckreiz meist Rötungen zwischen dem 3. und 4. Zeh, da es dort am feuchtesten ist. Anschließend können juckende Bläschen und weiß aufgequollene Schüppchen auftreten. Leichte Verletzungen am Fuß begünstigen eine Infektion. Das Pilzwachstum kann sich auf die ganze Fußsohle und

weitere Hautpartien ausdehnen, auch Haare, Nägel, Bartbereich und Mundschleimhaut können befallen werden.

Die Erreger sind überall zu finden, wo Menschen barfuß laufen, auch wenn der Befall meistens durch infizierte Hautschuppen in Hallenbädern, Badeanstalten, Duschen, Umkleideräumen, Saunen und Teppichböden in Hotels erfolgt. In der Familie kann man sich gleichfalls anstecken, wenn ein Familienmitglied betroffen ist. Geliehene Sportschuhe und -socken sind weitere Infektionsquellen. Der Befall der Füße kann auch von Tieren, Straßenstaub, Gartenerde oder von anderen Körperbereichen ausgehen, zum Beispiel dem Genitalbereich. Die Gefährlichkeit der Fußpilze liegt hauptsächlich darin, daß sie leicht übertragbar und unempfindlich gegen die üblichen Wasch- und Reinigungsmittel sind. Besonders groß ist die Gefahr für eine Infektion bei Risikogruppen, Diabetes-Patienten und anderen Personen, die unter Durchblutungsstörungen leiden. Die Pilzsporen überleben mehrere Jahre in Nägeln und an den abgefallenen Hautschüppchen in Teppichen. Pilzinfektionen sollten so früh wie möglich behandelt werden. Auch nach einer anfangs erfolgreichen Behandlung ist die Rückfallquote sehr hoch. Es ist eine Wochen oder sogar Monate dauernde Behandlung mit Medikamenten (Fungiziden) notwendig, auch nach Verschwinden der Symptome, da erst nach dieser langen Bekämpfung alle Pilze abgetötet sind. In die von Pilzen verursachten kleinen Risse können sekundär Bakterien in den Körper eindringen und sogar, bei geschwächtem Immunsystem, eine Wundrose auslösen.

Lebensbedrohende Pilzerkrankungen sind insgesamt selten, aber haben die Erreger erst innere Organe befallen, sind die Überlebenschancen gering. Besonders gefährlich werden die Pilze bei einer allgemeinen oder vorübergehenden Abwehrschwäche, beispielsweise durch Streß, Krankheit, bei Einnahme bestimmter Medikamente oder auch unter ungewohnten Klimabedingungen. In diesen

Fällen können die Pilzhyphen in tiefere Körperteile eindringen, sie besiedeln und innere Organe angreifen.

So sind beispielsweise Krebspatienten nach einer Chemotherapie stark gefährdet, da neben einer Schwächung der Immunabwehr auch die Schleimhäute von Mund und Darm geschädigt werden, so daß die Pilze leicht ins Körperinnere gelangen können.

In sehr schweren Fällen können sich die Pilze beispielsweise im Atmungstrakt ausbreiten und tödliche Erkrankungen hervorrufen. Heute beobachtet man immer öfter Infektionen mit *Aspergillus fumigatus*. Dieser Schimmelpilz lebt normalerweise saprophytisch, ist überall verbreitet und auch in der Luft nachzuweisen. Mensch und Tier atmen daher fortwährend Konidien des Pilzes ein, die normalerweise durch das Immunsystem erfolgreich bekämpft werden. Der Befall, beispielsweise der Lunge, erfolgt daher fast ausschließlich bei Menschen, deren Immunsystem durch bestimmte Medikamente oder Krankheiten geschwächt ist.

Erreger einer gefürchteten, den ganzen Körper erfassenden Pilzinfektion (systemische Mykose, Candidiose) sind auch die normalerweise harmlosen Hefepilze der Gattung *Candida*. Diese Hefe, die mit Sproßzellen oder in fädiger Form wächst, findet man auf der Haut jedes Menschen. Bereits in Streßsituationen und bei geschwächten Menschen kann *Candida* aber auch Schleimhäute besiedeln und Entzündungen hervorrufen (Soor). Bereits bei einer hormonalen Umstellung oder in der Schwangerschaft kann *Candida* beispielsweise die Scheide besiedeln (Scheidenpilz), wo sie quälenden Juckreiz und Brennen verursacht. Oft befällt sie die Mundschleimhaut von Säuglingen.

Candida läßt sich auch im Magendarmtrakt nachweisen. Wieweit eine höhere Zellzahl im Darm der Gesundheit schadet, ist noch umstritten. Die Experten sind sich auch noch nicht darüber einig, was als normale und was als erhöhte *Candida*-Konzentration im Darm anzusehen ist.

Ein weiterer Hefepilz, *Malassezia furfur* (= *Pityrosporum orbiculare*), der normalerweise als harmloser Kommensale auf jedem Menschen vorkommt, scheint bei verschiedenen ungünstigen Faktoren (Streß, Klima, Ernährung, Schwächung des Immunsystems, hormonale Umstellung) sich stark zu vermehren und die Kopfhaut zu reizen. Dadurch entzündet sich diese, und es kommt zu einer krankhaften Schuppenbildung. Außerdem kann dieser Hefepilz andere Hautpartien befallen (Pityriasis versicolor). Auf der Haut treten dann scharf begrenzte, gelbbräunliche Flecken, oft auch mit einer mehlstaubartigen Schuppung, auf, gelegentlich von einem stärkeren Juckreiz begleitet. In Amerika und Afrika gibt es eine Reihe weiterer schwerster Erkrankungen, die durch andere Pilzarten hervorgerufen werden, aber – von Ausnahmen abgesehen – erst bei geschwächten Abwehrkräften auftreten. Die Pilze siedeln unter der Haut oder können auch die Lunge und andere Organe befallen. Eine Erkrankung der Lunge ist beispielsweise die Histoplasmose; sie wird durch den Pilz *Histoplasma capsulatum* verursacht, der im Erdboden, Vogelkot und an Fledermausnistplätzen in Afrika, Amerika, Asien vorkommt. Weitere innere Pilzkrankheiten sind die Nordamerikanische und Südamerikanische Blastomykose, die durch *Blastomyces dermatidis* beziehungsweise *Paracoccidioides brasiliensis* ausgelöst werden.

Auffällig sind die von *Sporothrix schenckii* verursachten großflächigen Entzündungen und Geschwüre an Gliedmaßen nach einer Verletzung. Erreger von Abszessen in Fuß- oder Handgelenken bei Menschen in den Tropen und Subtropen (Maduramykose, Myzetom) sind verschiedene Pilze (zum Beispiel *Madurella mycetomi*); ähnliche Geschwülste werden aber auch durch fädige Bakterien (zum Beispiel Nocardien) gebildet.

Pilze können nicht nur sofort erkennbare Krankheiten auslösen, sondern durch besondere Giftstoffe (Mykotoxine)

die Gesundheit von Tier und Mensch aufs schwerste bedrohen (siehe Kapitel 9, Schimmelpilze).

Mutterkorn und das Antoniusfeuer

Ende des 10. und während des 11. Jahrhunderts trat in Westeuropa eine heimtückische Seuche auf, die Tausende dahinraffte und unsägliche Qualen und großes Leid verursachte. Nach mittelalterlichen Chroniken starben zwischen dem Jahr 1000 und 1500 in Europa mehr als 100 000 Menschen an dieser Seuche, die als «Heiliges Feuer» (*Ignis sacer*), «Antoniusfeuer» oder auch nach den Symptomen als «Kriebelkrankheit» bezeichnet wurde.

Ursache für diese Krankheit ist das *Mutterkorn*. Als Mutterkorn (französisch *ergot*) werden die spornartigen dunklen Auswüchse in den Ähren von verschiedenen Wildgräsern und Getreidearten (besonders Roggen) bezeichnet. Es sind verdichtete und verhärtete Mycelformen eines Schlauchpilzes, der als fakultativer Parasit lebt und im Spätsommer und Herbst viele Körner zu den dunkelpurpurfarbenen Mutterkörnern umwandelt.

Der Zusammenhang zwischen Genuß von Brot aus mutterkornhaltigem Mehl und dem seuchenhaften Auftreten des Antoniusfeuers wurde 1676 von dem französischen Arzt D. Dodart (1634–1707) durch Tierexperimente mit Hühnern bestätigt und beschrieben. Die Giftwirkung des Mutterkorns wurde jedoch bereits von Tuillier 1630 erkannt; seine Ergebnisse wurden aber nicht veröffentlicht.

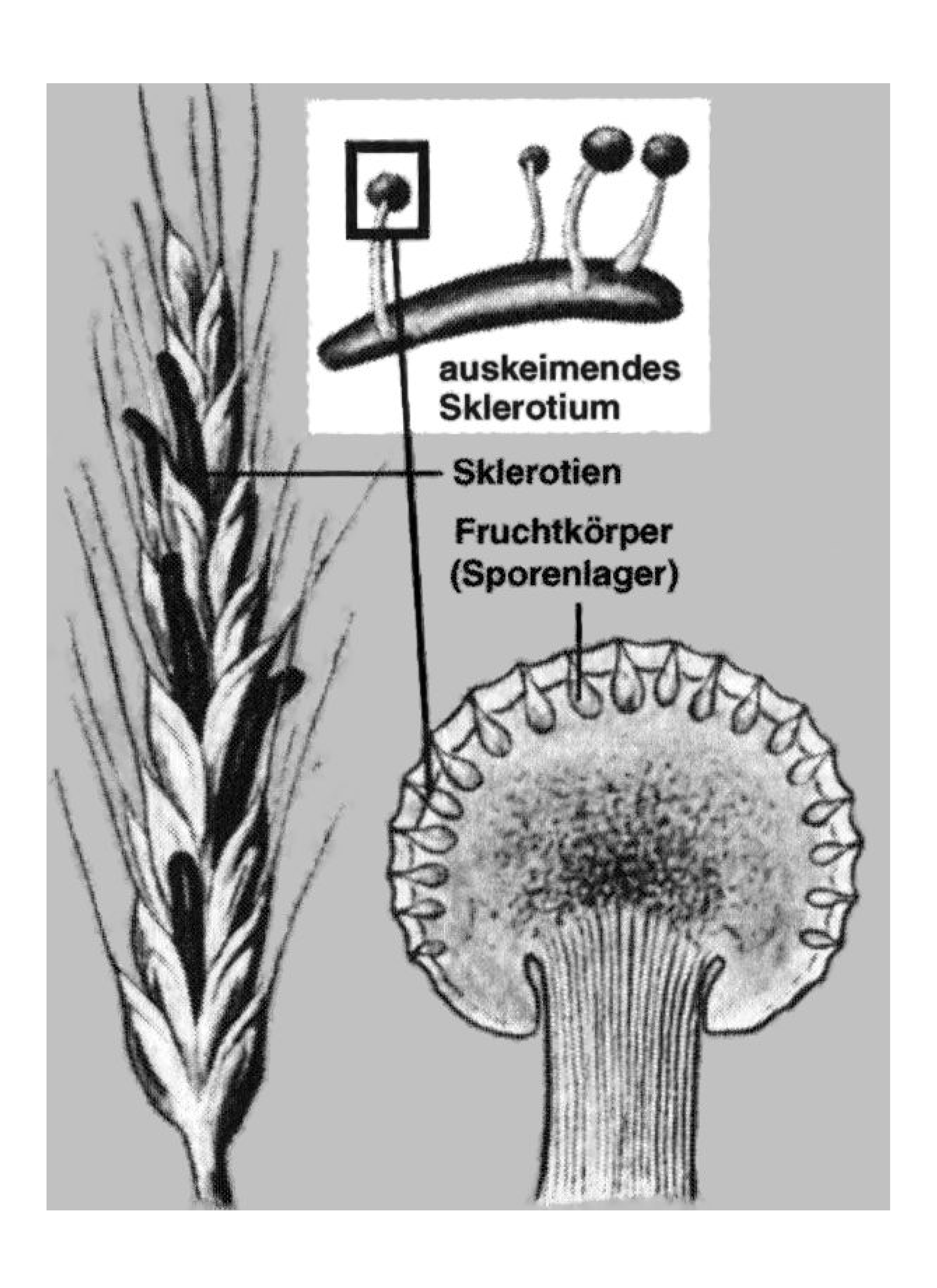
Die Pilznatur des Mutterkorns wurde wahrscheinlich zuerst von dem deutschen Botaniker Otto von Münchhausen 1764 nachgewiesen, aber erst allgemein anerkannt, als der berühmte französische Botaniker de Candolle seine Befunde bestätigte.

Der gesamte Entwicklungszyklus des Erregers wurde etwa 100 Jahre später von dem französischen Juristen und Arzt L.

R. Tulasne (1853) vollständig aufgeklärt, der den Pilz *Claviceps purpurea* benannte.

Die Infektion des Wirtes erfolgt durch die Pilzsporen, die im Frühjahr an Narben von Roggen sowie von Wildgräsern gelangen und dort keimen. Es bilden sich Hyphen, die in den Fruchtknoten eindringen, ihn unter Zerstörung des Gewebes durchwuchern und in eine dichte Mycelmasse umwandeln. Am Mycel entstehen nach kurzer Zeit in großen Massen ungeschlechtliche Sporen (Konidien). Gleichzeitig wird eine süße Flüssigkeit (Honigtau) zum Anlocken von Insekten ausgeschieden.

Abbildung 20: Der Mutterkornpilz (*Claviceps purpurea*) wächst in den Blüten von Getreidepflanzen und bildet dort ein 2–4 Zentimeter langes hornartiges Mycel (Sklerotium). Dieses «Mutterkorn» fällt auf den Boden oder wird mit dem Saatgut auf den Acker gebracht, wo es im Frühjahr mehrere gestielte Köpfchen hervorbringt, in denen sich zahlreiche Sporenlager bilden. Die reifen Sporen infizieren dann wieder die heranwachsenden Wirtspflanzen.


auskeimendes
Sklerotium
Sklerotien
Fruchtkörper
(Sporenlager)

Von den Insekten werden die äußerlich haftenden Konidien auf andere Blüten übertragen, wo sie keimen und Infektionshyphen bilden. Aus dem Mycel wächst später, wenn die nicht befallenen Fruchtknoten zu Samen reifen, das Pilzmycel in die Länge, verdichtet sich und bildet ein weit aus der Ähre ragendes, hornartiges Sklerotium, das *Mutterkorn* (beim Roggen bis 4 Zentimeter lang, Abbildung 20).

Die zur Erntezeit auf den Boden fallenden oder mit ungereinigtem Saatgut ausgesäten Sklerotien keimen im folgenden Frühjahr aus und bilden Perithecium-Fruchtkörper, in denen sich die Ascosporen entwickeln, die dann wieder Getreide infizieren.

Wahrscheinlich gibt es keinen anderen Pilz, der so viele Vergiftungen verursacht hat. Der Grund liegt darin, daß im Mittelalter Getreide Hauptnahrungsmittel war. Am stärksten wurde die ärmere Bevölkerung betroffen, da von ihr das billigere, aus ungereinigtem Getreide hergestellte Brot ohne hochwertige Beikost verzehrt wurde und besonders in schweren Zeiten noch die letzten Kornreste einschließlich des Mutterkorns von den Feldern eingesammelt wurden.

Die toxische Wirkung von Mutterkorn war bereits den Assyrern aufgefallen. Um 600 vor Christus nannten sie das spornähnliche Gebilde des Mutterkorns «eine schädliche Pustel in der Ähre des Korns».

Über eine Massenvergiftung durch das Mutterkorn ist bereits im Jahre 800 nach Christus berichtet worden. Eine verheerende Epidemie trat auch 1770–1772 vorwiegend in Norddeutschland auf. Die Ursache war ein sehr nasser Sommer, durch den die Entwicklung des Mutterkornpilzes sehr stark gefördert wurde. Zusätzlich fand in diesen Jahren eine Hungersnot und Teuerung statt, so daß das Getreide nicht ausreichend von den Mutterkörnern gereinigt wurde.

Während einer größeren Epidemie 1926/27 in Südrußland, zwischen Kasan und Ural, sollen in mehr als 11 000 Fällen Erkrankungen aufgetreten sein. Die letzte Massenvergiftung

in Deutschland trat in den 80er Jahren des 19. Jahrhunderts auf, bei der etwa 500 Menschen betroffen waren.

Der Rückgang der Vergiftungen durch das Mutterkorn ging in Deutschland auf verbesserte Kontrollen in den Mühlen und später auf natürliche Weise zurück, als nicht mehr Getreide, sondern die von Friedrich dem Großen (1712–1787) in Preußen eingeführte Kartoffel Hauptnahrungsmittel der armen Leute wurde (Kartoffelbefehl 1756).

Das «heilige Feuer» tritt in zwei Formen auf: Bei der epileptischen Form, dem *Ergotismus convulsivus*, findet eine Schädigung der Nerven statt, dadurch werden nervöse Muskelkrämpfe mit epileptischen Symptomen ausgelöst. Die zweite Form, der *Ergotismus gangraenosus*, ist ein Brand, bei dem die peripheren Blutgefäße geschädigt werden. Dadurch kann es zu einem Verlust von Nase, Ohrläppchen, Finger, Zehen, Fuß oder anderen Körperteilen kommen. Delirien und Halluzinationen sind Begleiter des Brandes. Die Erkrankung war stets mit einem brennenden Gefühl in Händen und Füßen verbunden. Der Chronist Sigbert von Gembloux schrieb 1089:

> *Viele verfaulen zu Fetzen, wie von einem heiligen Feuer verzehrt, das ihnen die Eingeweide auffraß; ihre Glieder, nach und nach zernagt, wurden schwarz wie Kohle. Sie starben schnell unter grauenhaften Qualen, oder sie setzten ohne Füße und Hände ein noch schrecklicheres Leben fort.*

In Frankreich pilgerten viele der Befallenen zu den Reliquien des heiligen Antonius, in der Hoffnung, Linderung zu erfahren. Der heilige Antonius, der als Einsiedler in Ägypten lebte, ist der Schutzheilige gegen Feuer, Epilepsie und Infektionskrankheiten; nach seinem Tod wurden seine Gebeine in die Benediktinerabtei Sankt Peter in Montmajour (Frankreich) überführt. Zur Versorgung der Pilger bildete sich dort eine Laienbruderschaft, aus der der Antoniusorden

(um 1090) hervorging. Der Orden breitete sich weltweit aus und ließ sich auch in Isenheim nieder, wo dem Meister Matthias Grünewald der Auftrag erteilt wurde, einen Altar zu schaffen. Im Flügel dieses «Isenheimer Altars» (wahrscheinlich zwischen 1513 und 1516 gestaltet), der heute im Museum Unterlinden in Colmar (Frankreich) zu besichtigen ist, werden die wichtigen Seuchen des Mittelalters dargestellt, so auch die Deformation des linken Armes eines am Antoniusfeuer erkrankten Mannes. Die Leiden des Antoniusfeuers sind auch von anderen berühmten Künstlern dargestellt worden, zum Beispiel von Hieronymus Bosch (1450–1516, Bettler und Krüppel).

Aufgrund spezieller Reinigungsverfahren des Getreides sind heute Mutterkornvergiftungen in den Industrienationen sehr selten geworden und treten meist nur im Zusammenhang mit einer Überdosierung von mutterkornhaltigen Medikamenten auf. In den letzten Jahren konnte allerdings eine Zunahme des Getreidebefalls beobachtet werden. Die Ursache liegt im Anbau von Hybridsorten des Roggens, die eine geringere Resistenz gegen Mutterkornpilze haben. Insbesondere beim Verzehr von ungereinigtem oder Vollkorn-Getreide besteht daher auch noch heute eine Vergiftungsgefahr.

Der Mutterkornpilz verursacht nicht nur schwerste Vergiftungen, sondern dient auch zur Herstellung von wichtigen Medikamenten für die Geburtshilfe. In den heiligen Büchern der Parsen (etwa 350 vor Christus) wird bereits die Wirkung von schädlichen Gräsern auf Schwangere erwähnt, die bei den Frauen eine Gebärmuttersenkung verursachen und sie im Kindbett sterben lassen. Die erste bekannte Erwähnung seiner medizinischen Anwendung als Wehenmittel in Europa und die Beschreibung des Mutterkorns findet man im Kräuterbuch des Frankfurter Stadtarztes Adam Lonitzer (Adamus Lonicerus, 1557). Aber schon zuvor wurde der Pilz von Hebammen als Wehenmittel genutzt. In der

Schulmedizin wurde seine Anwendung erst 1808 anerkannt, nachdem ein Artikel des berühmten amerikanischen Arztes J. Stearns über die Wirksamkeit des Pilzes während der Geburt erschienen war.

Der Name Mutterkorn bezieht sich nicht auf die Anwendung in der Geburtshilfe, sondern ist mythologischen Ursprungs. Man erklärte die Vergrößerung der Getreidekörner damit, daß die Kornmutter (Kornmuhme) durch die Felder gegangen sei.

Aus dem Mutterkorn wurden etwa 30 pharmazeutisch wirksame Stoffe isoliert. Es sind hauptsächlich Lysergsäure-Alkaloide (siehe unten), die hauptsächlich in der Frauenheilkunde therapeutisch eingesetzt werden. Einige davon bewirken bereits in geringster Dosierung rhythmische Kontraktionen der glatten Muskulatur der Gebärmutter und werden daher noch heute als Wehenmittel zur Geburtseinleitung geschätzt.

Kommerziell werden die Mutterkornpilze auf künstlich infiziertem Roggen gezüchtet. Vorstufen der Alkaloide werden auch aus Mycelien von *Claviceps*-Arten extrahiert, die in Fermentern kultiviert wurden. Die gewünschten Verbindungen lassen sich dann durch chemische Modifikationen erhalten.

Abbildung 21: Chemische Formel von LSD-25, einem Abkömmling der Lysergsäure

Die Mutterkornalkaloide wurden in der Firma Sandoz (Schweiz) eingehend untersucht, isoliert und chemisch modifiziert, um besser wirksame Medikamente zu erhalten. Die Entwicklung neuer Verbindungen führte 1938 auch zur Entdeckung von Lysergsäure, von der verschiedene Derivate synthetisiert wurden. Fünf Jahre später, als Albert Hofmann sich noch einmal mit der 25. Modifikation der Lysergsäure, dem Lysergsäurediethylamid (LSD-25, Abbildung 21), befaßte, wurde diese Verbindung weltweit bekannt.

Bei erneuter Herstellung dieser Verbindung am 16. April 1943 wurde er im Labor von einem merkwürdigen Schwindelgefühl befallen. Er begab sich nach Hause, wo er sich niederlegte und in einen rauschartigen, durch angeregte Phantasien gekennzeichneten Zustand versank. Hofmann vermutete, daß diese Bewußtseinsänderung durch den modifizierten LSD-Wirkstoff verursacht worden war, mit dem er im Labor zufälligerweise in Berührung gekommen sein mußte. Um diese Annahme zu beweisen, nahm er drei Tage nach dem «Unfall», diesmal bewußt, 250 Mikrogramm LSD zu sich: die Wirkung war wieder ein starker Rauschzustand. Damit war die starke Droge LSD entdeckt, von der bereits 25 Mikrogramm oder sogar noch geringere Mengen genügen, Menschen einen ganzen Tag glücklich zu machen, wie Hofmann nach seinen Selbstversuchen schrieb.

In den 60er und 70er Jahren wurde LSD die Modedroge für die Hippiebewegung. Vertreter dieser Bewegung meinten, daß LSD-Gaben zu einer besseren Wiedereingliederung von Gefangenen oder Erhöhung der Kreativität von Künstlern eingesetzt werden sollte. Von einigen LSD-Anhängern wurde sogar der phantasievolle Vorschlag gemacht, die Droge in die Trinkwasserleitungen zu schmuggeln, um alle Menschen glücklich zu machen, oder heimlich dem USA-Präsidenten zu verabreichen, mit dem Ziel, den Vietnamkrieg und auch andere Kriege zu stoppen.

Fallensteller und einige andere räuberische Pilze

Sehr viele Pilze leben auch als Parasiten in oder auf Pflanzen und Tieren. Eine besondere, ungewöhnliche Art des Erwerbs von Nahrung findet man bei den räuberischen Pilzen (Raubpilzen). Sie ernähren sich von lebenden tierischen Organismen oder Einzellern. Unter den Höheren Pilzen sind es Bodenpilze aus verschiedenen taxonomischen Gruppen (circa 160 Arten).

Sie wachsen entweder endoparasitisch in Amöben oder anderen kleinen Bodentieren oder fangen Nematoden (Älchen). Bei den Endoparasiten, zum Beispiel *Harposporium anguillulae*, findet der gesamte Entwicklungszyklus (außer der Sporenbildung) innerhalb des Wirtes statt. Nematophage Pilze, die Nematoden einfangen und als Nahrung nutzen, bilden ihr Mycel hauptsächlich außerhalb des Wirtes und können auch saprophytisch von abgestorbenem organischem Material leben.

Zum Fangen der Nematoden dienen dreidimensionale klebrige Fangnetze, oder es werden besondere Fangmechanismen ausgebildet: klebrige Fanghyphenfortsätze, kontrahierbare Fangringe, nichtkontrahierbare Fangringe oder verschiedengeformte, klebrige Fangknoten. Mit besonderen Hyphen (Penetrationshyphen) wird die Chitinumhüllung (Cuticula) des eingefangenen Opfers durchstoßen, dann wird es von Ernährungshyphen, die Verdauungsenzyme ausscheiden, durchwachsen.

Auch in den anderen Pilzabteilungen gibt es viele parasitische Arten, die Insekten, Fadenwürmer, Algen oder andere Pilze als Nahrung nutzen. Unter den Flagellatenpilzen (Chytridiomyceten) befällt zum Beispiel *Polyphagus euglenae* Algen der Gattung *Euglena* und saugt sie aus; Arten der Gattung *Arnaudovia* fangen Einzeller an

der Wasseroberfläche mit sechs langen, feinfiedrigen Hyphen ein. Die Vertreter der Zoopagales (Abteilung Jochpilze) parasitieren auf Amöben, Nematoden oder anderen kleinen Bodentieren. Andere Formen fangen die Opfer mit klebrigen Substanzen, die vom Mycel ausgeschieden werden.

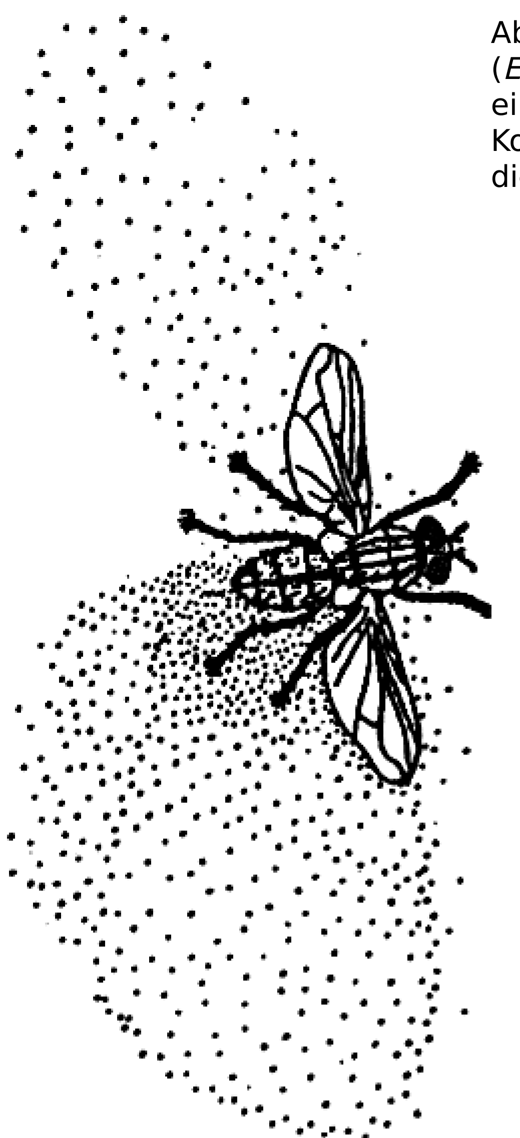


Abbildung 22: Eine vom Fliegenschimmel (*Entomophthora muscae*) befallene Fliege an einer Fensterscheibe. Der Pilz hat bereits seine Konidien ausgeschleudert, die als weißer Saum die tote Fliege umgeben.

Eine epidemische Krankheit bei der Stubenfliege und anderen Insekten wird durch einen parasitischen Jochpilz, den Fliegenschimmel (*Entomophthora muscae*), hervorgerufen. Im Herbst beobachtet man oft an Fensterscheiben sitzende tote Fliegen, die von einem

weißen Saum umgeben sind. Hierbei handelt es sich um Konidien des Fliegenschimmels (Abbildung 22).

Gelangen die Konidien auf noch lebende Fliegen, dringen sie mit einem Keimschlauch durch die Atemöffnung in die Tiere ein. Die Pilze entwickeln sich hauptsächlich im Fettgewebe, durchwachsen dann den Wirt und bilden schließlich Konidienträger, die massenhaft aus der toten, festsitzenden Fliege herauswachsen. Die reifen Konidien werden abgeschleudert, so daß wieder ein weißer Saum um die Fliege entsteht.

In Australien wird seit 1993 ein auffällig erhöhtes Sterben von Fröschen, Kröten und anderen Amphibien beobachtet. Der Rückgang verschiedener Amphibienarten hat sich in den letzten Jahren weltweit fortgesetzt. In einigen Regionen Südamerikas sind bereits ganze Populationen bestimmter Frösche verschwunden. Wahrscheinlich sind mehrere Ursachen für das Amphibiensterben verantwortlich, doch spielt der Chytridiomyceten-Pilz *Batrachochytrium dendrobatidis*, der bisher bei etwa 40 Amphibienarten nachgewiesen wurde, sicher eine wichtige Rolle. Die Pilze befallen die keratinhaltigen Hautbestandteile, dadurch kann die Hautatmung und die Wasseraufnahme der Tiere stark beeinträchtigt werden. Der zunehmende Befall der Amphibien durch diesen Flagellatenpilz wird von einigen Autoren auf Streß und die Klimaveränderungen, besonders auf die höhere UV-Strahlung, zurückgeführt. Dadurch soll sich die Zusammensetzung der Amphibienhaut so verändert haben, daß Pilzinfektionen nicht mehr wirkungsvoll verhindert werden können.

Die Infektion von Insekten durch verschiedene Pilze kann zur biologischen Schädlingsbekämpfung ausgenutzt werden. Es gibt bereits eine Reihe kommerziell hergestellter Präparate, die man zur Verringerung des Schädlingsbefalls von Nutzpflanzen einsetzt oder die noch in der Erprobung sind. Besonders wichtig ist *Beauveria bassiana* (= *Cordyceps bassiana*), ein Schlauchpilz, der zu den

Kernkeulen gehört, die mit den Mutterkornpilzen verwandt sind. *Beauveria* wurde bereits 1835 von A. Bassia als Erreger der tödlichen «Moscardiokrankheit» bei den Seidenraupen erkannt. Dieser Pilz besiedelt aber auch viele andere Insektenlarven und tötet sie ab. So kann oder könnte er als «Nützling» gegen Blattläuse, die Weiße Fliege, Thripse, Zikaden, Rüsselkäfer und eine große Zahl anderer Insekten eingesetzt werden. Anderseits wird versucht, Pilze zu finden, die kein breites Wirtsspektrum befallen, sondern nur ganz bestimmte Insektenschädlinge abtöten.

Der Vorteil von Pilzen zur Schädlingsbekämpfung liegt darin, daß die Schädlinge auch bei wiederholter Anwendung nicht gegen den Pilz resistent werden, ihr Nachteil ist jedoch, daß zur schnellen Ausbreitung der Pilze normalerweise eine hohe Luftfeuchtigkeit und höhere Temperaturen notwendig sind.

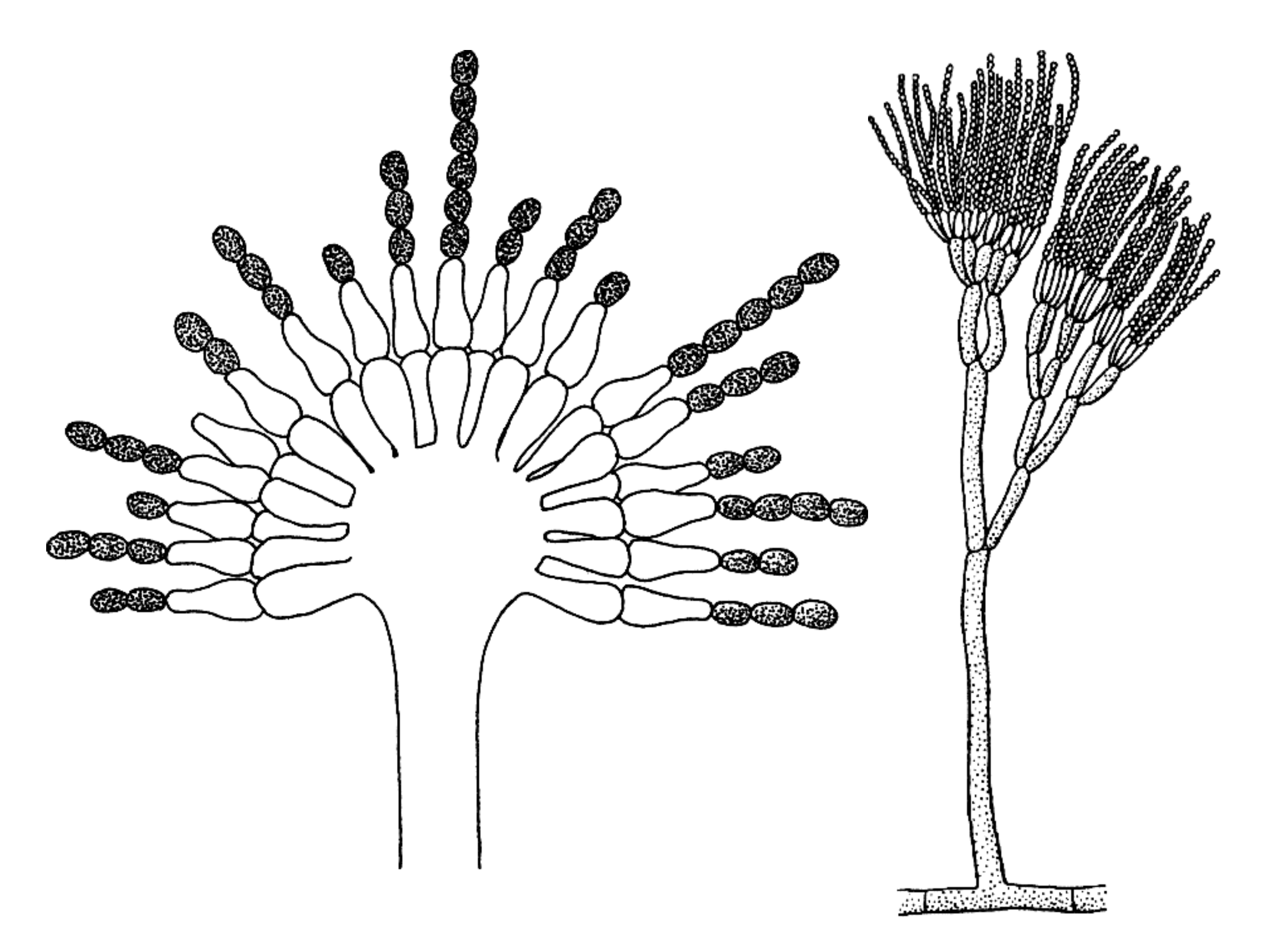
Pilze sind auch die wichtigsten Pflanzenparasiten und verursachen die meisten und oft auch verheerenden Pflanzenkrankheiten (siehe Kapitel 11).

9. Schimmelpilze und Schimmelpilzgifte

Vorkommen und Bedeutung

Schimmelpilze dienen von alters her, anfangs unbewußt, heute gezielt eingesetzt, neben Bakterien und Hefen zur Herstellung verschiedener Lebensmittel. In Europa handelt es sich traditionell um die Veredelung und Reifung von bestimmten Käsesorten (Weißschimmelkäse, zum Beispiel Brie und Camembert, sowie Blauschimmelkäse, zum Beispiel Gorgonzola, Roquefort und Bavaria blu). Zur Verbesserung des Aromas und der Konservierung werden auch bestimmte Rohwurstsorten (zum Beispiel Salami) an der Oberfläche mit Schimmelpilzen (zum Beispiel *Penicillium*) und Hefen zur Reifung beimpft.

Abbildung 23: Konidienträger mit Konidien (dunkle, eiförmige Zellen) von zwei Schimmelpilzen: a) Gießkannenschimmel (*Aspergillus*), b) Pinselschimmel (*Penicillium*)



Schimmelpilze gehören keiner bestimmten systematischen Pilzgruppe an; es ist die volkstümliche Bezeichnung für Pilze, die watteartige oder grießartige Kolonien auf verschiedenen Substraten bilden. Die meisten Schimmel gehören zur Gruppe der Schlauchpilze oder zu den Jochpilzen. Die Fortpflanzung der Schimmelpilze ist meist ungeschlechtlich. Die Sporen oder Konidien, die meist auf feinen Trägern emporgehoben werden, lassen sich in älteren Schimmelrasen bereits mit der Lupe erkennen. Nach ihrem Aussehen, ihren Konidien und Konidienträgern beziehungsweise Sporangien werden *Penicillium*-Arten als Pinselschimmel, *Aspergillus*-Arten als Gießkannenschimmel und *Mucor*-Arten als Köpfchenschimmel bezeichnet (Abbildung 23). Oft sind die Kolonien durch die Fortpflanzungsorgane grünlich, blaugrün oder auch schwarz gefärbt. Die typische Färbung der Kolonie wird gleichfalls zur

Benennung verwandt; so sind schwarz aussehende Kolonien, zum Beispiel von *Aspergillus niger*, als «Schwarzschimmel» bekannt. Ihre Verwendung durch den Menschen dient auch zur Namensgebung: Formen, die zur Veredelung und Reifung von Nahrungsmitteln dienen, bezeichnet man als *Edelschimmel*, beispielsweise bei einigen Käsesorten. Die Benennung einiger Formen erfolgt außerdem nach dem Substrat, auf dem sie oft wachsen, zum Beispiel Brotschimmel.

Der Name kann auch, abhängig vom Zeitpunkt des Befalls, wechseln. Der Grauschimmel (*Botrytis cinerea*) ist Erreger der gefürchteten *Sauerfäule*, wenn er die jungen, unreifen Beeren der Rebe befällt, und heißt *Stielfäule* bei Befall der Traubenstiele oder des Traubengerüsts. Erfolgt die Infektion dagegen erst, wenn die Beeren (Weintrauben) voll ausgereift sind, spricht man von *Edelfäule*. Durch das Wachstum des Schimmels auf der Beerenhaut wird sie für Wasser durchlässiger, so daß der Zuckergehalt in den Beeren konzentriert wird. Die Folge sind hochwertige Prädikatsweine, zum Beispiel Beerenauslesen.

Schimmelpilze sind weltweit verbreitet. Ihr natürlicher Lebensraum ist der Boden, wo sie saprophytisch von abgestorbenen organischen Substanzen leben. Sie lassen sich aber auch in der Luft und im Wasser nachweisen und wachsen oft auf gelagerten Früchten, Getreidekörnern, Fleisch, Gemüse, Obst, Obstsäften, Textilien, Stroh, Fleisch und Mehlprodukten. Sie sind an der Zerstörung verschiedener Materialien beteiligt und verderben Nahrungsmittel. Anderseits werden Schimmelpilze auch zur Nahrungsmittelproduktion eingesetzt. In der Veredelung von Nahrungsmitteln verwendet man hauptsächlich Arten der Gattung *Penicillium* und *Aspergillus*.

Auf der gesunden Haut und den Schleimhäuten des Menschen können auch Schimmelpilze leben, ohne pathogen zu sein, zum Beispiel Vertreter der Gattung *Aspergillus*, *Penicillium* oder *Mucor*. Wenn aber die

Immunabwehr durch eine Krankheit oder aus anderen Gründen vermindert ist, kann es zu gefährlichen Infektionen kommen (siehe Seite 63).

Eine weitere meist unterschätzte Gefahr für die Gesundheit des Menschen sind Mykotoxine, niedermolekulare, komplexe Giftstoffe, die viele Schimmelpilze auf Nahrungsmitteln ausscheiden.

Schimmelpilzgifte (Mykotoxine)

Die Gefährlichkeit der Mykotoxine wurde erst 1960 erkannt, als in England über 100 000 junge Truthähne verendeten und etwa zur gleichen Zeit in den USA über eine Million Zuchtforellen starben.

Für dieses Massensterben waren proteinreiche Preßrückstände verantwortlich, die bei der Gewinnung von Erdnußöl anfallen. Auf diesen Rückständen, die dem Futter beigemischt wurden, hatte sich während der Lagerung der Pilz *Aspergillus flavus* ausgebreitet. Wie die späteren eingehenden Untersuchungen ergaben, scheiden Stämme dieses Schimmelpilzes ein heimtückisches Gift aus, das in relativ geringer Konzentration auch beim Menschen die Leber schädigt und krebserregend ist. Die tödliche Menge für den Menschen wird auf 1–10 Milligramm pro Kilogramm Körpergewicht geschätzt. Nach dem Pilznamen (***A****spergillus* ***fla****vus*) wurden diese Mykotoxine als Aflatoxine bezeichnet.

Aspergillus wächst auf fast allen Lebensmitteln; besonders oft (mit hoher Toxinbildung) auf fetthaltigen Früchten wie Nüssen oder Erdnüssen. Die vielen Erkrankungen an Leberkrebs in einigen tropischen Gebieten, wo Erdnüsse gern verzehrt werden, führt man auch auf einen Schimmelpilzbefall bei der Lagerung unter den dort herrschenden feuchten, warmen Bedingungen zurück.

Mykotoxine weisen vielfältige toxische Eigenschaften auf: Sie können Krebs erzeugen (zum Beispiel Aflatoxine, Ochratoxin A, Patulin), Mißbildungen auslösen (zum Beispiel

Ochratoxin A), mutagen wirken (zum Beispiel Aflatoxine), das Immunsystem beeinträchtigen (zum Beispiel Aflatoxine), die Haut schädigen (zum Beispiel Trichothecene), Nierenschädigungen verursachen (zum Beispiel Ochratoxin A, Trichothecene), die Haut sowie Zellen schädigen (zum Beispiel Trichothecene), das Nervensystem angreifen (zum Beispiel Mutterkornalkaloide), Blutungen hervorrufen (zum Beispiel Trichothecene) und das Hormonsystem beeinflussen (zum Beispiel Zearalenon).

Das Tückische an Mykotoxinen ist, daß sie beim Menschen anfangs selten akute Beschwerden hervorrufen, sondern meist über lange Zeit zu chronischen Erkrankungen führen. Diese Giftstoffe gelangen meist mit verunreinigten Nahrungsmitteln in den Körper von Haustieren und Mensch. Eine lange übersehene Vergiftungsquelle ist auch verschimmeltes Getreide, das gleichfalls die Gesundheit von Mensch und Tier ernsthaft gefährden kann. Das Getreide kann bereits auf den Feldern, besonders in feuchten Sommern, oder bei der Lagerung von Schimmelpilzen befallen werden. Wichtigste Parasiten auf Getreidepflanzen sind *Fusarium*-Arten (zum Beispiel *Fusarium graminearum*). Sie bilden eine Reihe von Giftstoffen (Trichothecene), hauptsächlich Deoxynivalenol (DON), das das Immunsystem schwächt und bei Schweinen zum Erbrechen führen kann. Der Befall von Weizen mit *Fusarium*-Pilzen ist ein weltweites Problem. So fand 1993 eine verheerende *Fusarium-Epidemie* in Nordamerika statt, durch die für die Landwirtschaft ein Schaden von etwa einer Milliarde US-Dollar entstand. In den Jahren 1944–1947 starben in einem Bezirk Rußlands Tausende Bewohner. Ursache war die Vergiftung durch Getreide, das erst im Frühjahr geerntet worden war, nachdem es im Winter unter einer Schneedecke gelegen hatte. Es gibt viele Hinweise dafür, daß die Getreidekörner durch einen Schimmelbefall verseucht worden sind. Aber erst 25 Jahre später fand man, daß für die Vergiftung das von *Fusarium*-Pilzen gebildete T2-Toxin verantwortlich

gewesen war. T2 und ähnliche Toxine wurden auch in geheimen Laboratorien für ihren Einsatz als Biowaffen getestet.

Ein weiteres wichtiges, weit verbreitetes Mykotoxin, das beispielsweise von *Aspergillus ochraceus* und *Penicillium verrucosum* auf Getreide, Kaffee und weiteren Nahrungsmitteln produziert wird, ist Ochratoxin A (OTA). Dieses Schimmelgift wird meist während einer falschen Lagerung gebildet und soll nieren- sowie keimschädigend (teratogen) und krebsauslösend (kanzerogen) wirken. Im Getreidelager werden die Giftpilze oft durch Milben verbreitet.

Ursache für die braunen Faulstellen im Obst ist meist der Befall durch verschiedene *Penicillium*-Arten, die den Giftstoff Patulin bilden, der als generelles Zellgift wirkt und auch krebserregend sein kann.

Die Synthese und Ausscheidung von Mykotoxinen ist vom Substrat und anderen Wachstumsbedingungen abhängig, so daß die Nahrungsmittel bei einem Schimmelpilzbefall nicht immer verseucht sein müssen. Zur Sicherheit, da nicht zu erkennen ist, wieweit Giftstoffe ausgeschieden wurden, sollte man verschimmeltes Brot und andere mit Pilzen befallene Nahrungsmittel grundsätzlich nicht verzehren. Auch beim Erhitzen werden die meisten Mykotoxine nicht zerstört, so daß durch Kochen oder Braten die Giftwirkung nicht verlorengeht.

Schimmelpilze verderben nicht nur Nahrungsmittel, sondern sind auch eine große Gefahr für die einzigartigen steinzeitlichen Wandmalereien von Bisons, Rentieren, Pferden und anderen Tieren in den Höhlen von Lascaux (Frankreich). Im September 2001 begann an den Wänden ein explosionsartiges Wachstum von äußerst resistenten Schimmelpilzen und Algen. Bisher konnte die Ausbreitung dieser Mikroorganismen nicht verhindert werden. Der Einsatz von Formalin, Fungiziden und anderen Chemikalien hat die Entwicklung der Schimmelpilze sogar verstärkt.

Immer wieder wurde vermutet, daß die mysteriösen Todesfälle von 30 Personen, die 1922 unmittelbar an der Freilegung der Mumie des ägyptischen Königs Tutanchamun (1347–1339 vor Christus) beteiligt waren, durch Schimmelpilze verursacht wurden. Die Weltpresse verbreitete diesen Verdacht als «Fluch des Pharao» in Anlehnung an eine Inschrift im Grab des Königs: *„Der Tod soll den mit seinen Schwingen erschlagen, der die Ruhe des Pharaos stört."* Bisher ist jedoch kein direkter Zusammenhang zwischen den Todesfällen, die oft Jahre später eintraten, und Schimmelpilzen gefunden worden. Neuere statistische Untersuchungen der Todesumstände bei den Personen aus dieser Ausgrabungsgruppe erbrachten gleichfalls keinen Hinweis für diese Schimmelpilz-Hypothese. Unbestritten ist jedoch, daß an konservierten Leichen viele Schimmelpilze, auch sehr giftige Arten, nachzuweisen sind. Es läßt sich daher nicht ganz ausschließen, daß Schimmelpilze von einbalsamierten Leichen in Einzelfällen Allergien auslösen oder für tödliche Erkrankungen mit verantwortlich sein könnten.

Eine nicht zu unterschätzende Gefahr für die Gesundheit besteht immer bei einer dauernden Belastung durch Schimmelpilzsporen oder Konidien in Wohnräumen. Wegen der heutigen extremen Wärmeisolierung, verbunden mit schlechter Lüftung, aber auch in schlecht isolierten Wohnungen wachsen sehr oft Schimmelpilze an den Wänden, besonders hinter Möbeln. Durch die Aufnahme der Pilzsporen (beziehungsweise Konidien) beim Atmen können beim Menschen schwere Allergien ausgelöst werden. Aber auch Vergiftungen durch Pilztoxine, die mit den Konidien oder kleinsten Mycel-Bruchstücken eingeatmet werden, sind in einigen Fällen als Wohngifte nachgewiesen worden. Besonders *Stachybotrys chartarum* scheint für eine Reihe von Beschwerden, von Übelkeit bis zu Lungenbluten (bei Säuglingen), verantwortlich zu sein. Oft läßt sich ein Schimmelpilz-Befall durch einen muffigen Geruch erkennen.

Dieser charakteristische «Schimmelduft» stammt von einem Gemisch verschiedener flüchtiger Verbindungen, die von den Pilzen gebildet werden. Es sind beispielsweise Alkohole, Terpene, Ketone, Ester und Aldehyde, die aber normalerweise keine gesundheitlichen Beschwerden verursachen.

Unter den Schimmelpilzen, zum Beispiel den *Penicillium*-Arten, die in der Herstellung von Nahrungsmitteln eingesetzt werden, gibt es auch Stämme, die Mykotoxine ausscheiden. Edelschimmel-Stämme, die bei der Reifung von Käse oder Rohwurst verwendet werden, bilden jedoch normalerweise keine schädlichen Stoffe.

Man sollte aber vorsichtig sein, wenn Edelpilzkäse bei der Lagerung von anderen Schimmelpilzen überwachsen wird.

Schimmelpilze spielen nicht nur bei der Herstellung bestimmter Nahrungsmittel, sondern auch bei der biotechnologischen Produktion verschiedener wichtiger Stoffe eine überragende Rolle (siehe nächstes Kapitel).

10. Pilze in der Biotechnologie

Die Tätigkeit der Mikroorganismen ist nicht nur im Naturhaushalt von größter Bedeutung. Der Mensch hat es vermutlich schon in vorgeschichtlicher Zeit verstanden, bewußt die Fähigkeit von Mikroorganismen auszunutzen, organische Stoffe in besondere Genuß- und Nahrungsmittel umzuwandeln. Die Ursachen für diese Veränderungen, die Stoffwechselaktivitäten von Bakterien und Pilzen, waren natürlich noch nicht erkannt.

Von den Sumerern ist überliefert, daß sie schon vor mehr als 6000 Jahren ein Bier brauten, und die Assyrer vergärten bereits um 3500 vor Christus Traubensaft zu Wein.

Für die Umwandlung von Zucker in den berauschenden Alkohol (Ethanol) und Kohlendioxid sind in beiden Getränken Hefen verantwortlich, hauptsächlich Stämme der Art *Saccharomyces cerevisiae*. Diese Hefe und andere Hefearten kommen in der Natur auf Pflanzensäften und anderen Substraten mit Glucose und anderen vergärbaren Zuckern vor. Ihr Abbau in den Zellen verläuft in einer Sauerstoffatmung bis zum Kohlendioxid und Wasser:

$$\text{Glucose } (C_6H_{12}O_6) + 6\ O_2 \rightarrow 6 \text{ Kohlendioxid } (6\ CO_2) + 6 \text{ Wasser } (6\ H_2O)$$

Wird ihr Wachstum durch einen Mangel an Sauerstoff gehemmt, scheiden sie Ethanol und Kohlendioxid als Endprodukte im Gärungsstoffwechsel aus (Abbildung 24):

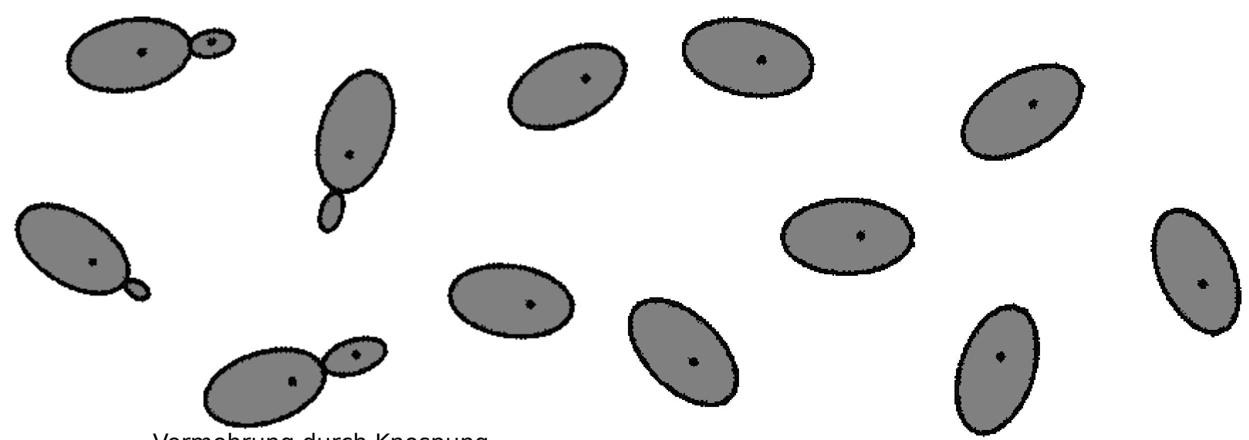


Abbildung 24: Unterschiedlicher Stoffwechsel von Hefen mit Glucose als Substrat: Bei Vorliegen von Sauerstoff wachsen und vermehren sie sich, bei Mangel an Sauerstoff findet kaum ein Wachstum, aber eine hohe Produktion von Ethanol statt.

$$\text{Glucose } (C_6H_{12}O_6) \rightarrow 2 \text{ Ethanol } (2\ C_2H_5OH) + 2 \text{ Kohlendioxid } (2\ CO_2).$$

Die Bildung von Kohlendioxid und Ethanol durch Hefen wird nicht nur zur Herstellung alkoholischer Getränke, sondern auch als biologisches Treibmittel

zur Lockerung von verschiedenen Brot- und Kuchenteigen genutzt. Im Natursauerteig zur Bereitung von Roggenbrot entwickeln sich neben Milchsäurebakterien gleichfalls Hefen, die den Teig durch ihre Gär-Endprodukte auftreiben.

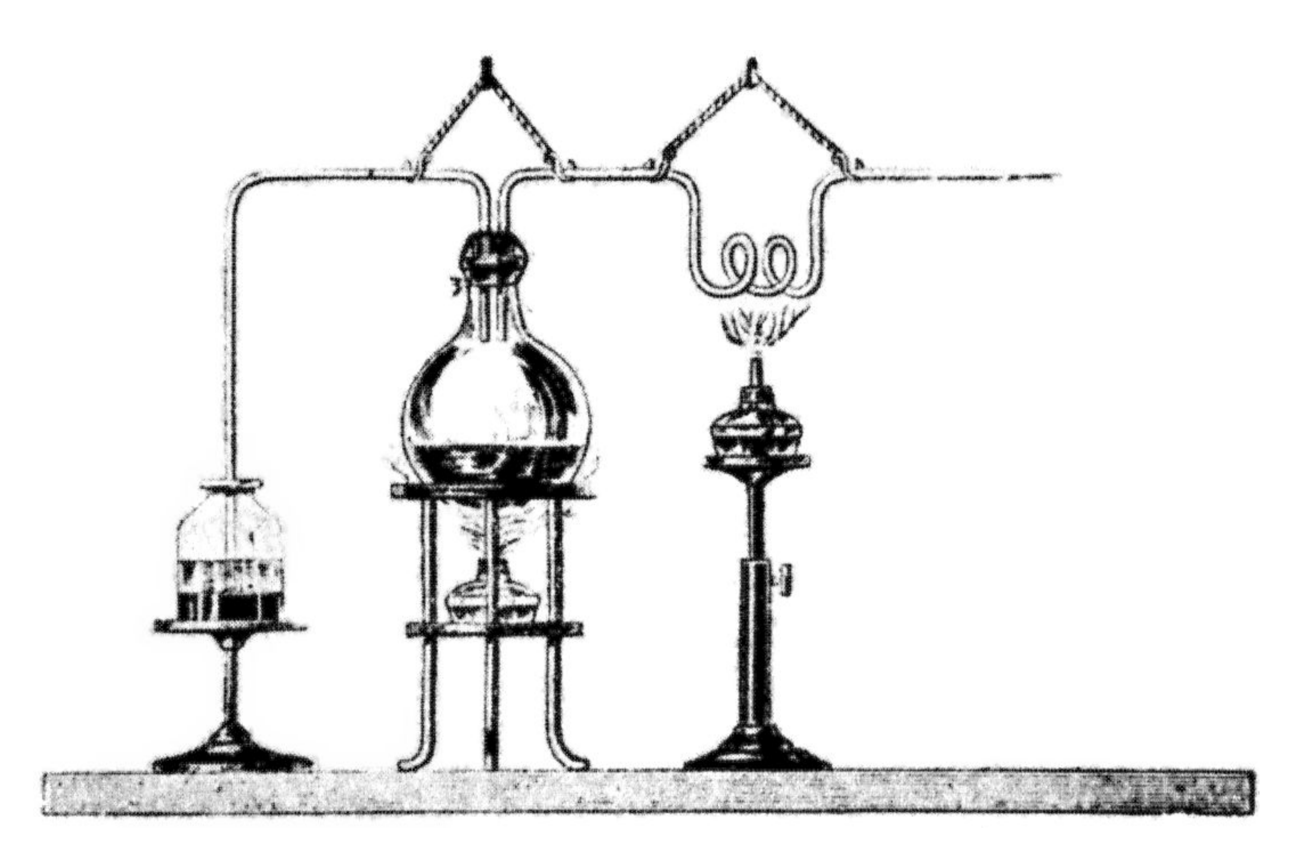
Hefen als «Nutzpflanzen»

Die Ansichten über die Umwandlung von organischen Stoffen bei Gärung und Fäulnis waren bis ins 19. Jahrhundert sehr unterschiedlich. Von einem Teil der Wissenschaftler wurde die ablaufende Stoffumwandlung als eine rein chemische Reaktion erklärt, bei der Organismen keine Rolle spielen. Von der Gegenseite wurde dagegen angenommen, daß die Stoffe durch die Tätigkeit von Organismen verändert werden oder daß dabei ein Prozeß abläuft, der von einer geistigen Kraft verursacht wird.

Der Nachweis, daß die alkoholische Gärung, auch Weingärung oder «geistige Gährung» genannt, durch Mikroorganismen hervorgerufen wird, gelang Theodor Schwann (1837) und Charles Cagniard-Latour (1837/1838). Schon zuvor wurden Hefezellen als hautbildende pilzliche Organismen auf verschiedenen zuckerhaltigen Flüssigkeiten beschrieben, diese Kahmhaut wurde von C. H. Persoon (1822) als *Mycoderma* bezeichnet. Als erster hat wahrscheinlich der Holländer Antony van Leeuwenhoek (1632–1723), der die Bakterien entdeckte, zeichnete und beschrieb, auch Hefezellen unter seinem Mikroskop beobachtet. Er hatte aber nicht erkannt, daß es sich um Organismen handelt. Erst 1833 beschrieb Traugott Kützing einen Hefepilz, den er *Cryptococcus* nannte; ein Gattungsname, der heute noch für einige asexuelle Hefen gebraucht wird. In späteren Arbeiten (1837, 1838) erwähnt er auch ihre Beteiligung an der Vergärung von Zucker, wie sich am Artnamen *Cryptococcus fermentum* erkennen läßt. Anfangs hielt er aber *Cryptococcus* für eine Algenart, schloß jedoch ihre pilzliche Natur nicht aus. Seiner Ansicht nach entstehen Hefen jedoch durch Urzeugung aus Unbelebtem:

> *Jeder zuckerhaltige Pflanzensaft geht in geistige Gährung über, und diese beginnt stets mit der Urbildung der Hefe.*

Abbildung 25: Schwannscher Versuchsansatz zum Nachweis, daß Gärungen nicht spontan beginnen und Luftkeime Ursache für die alkoholische Gärung sind (siehe Text).



Im Gegensatz dazu standen die Untersuchungen von Theodor Schwann; er veröffentlichte seine Beobachtungen über die alkoholische Gärung (1837), in der er die spontane Entstehung von Hefen widerlegte und gleichzeitig die Hefen als Ursache für die Umwandlung von Zucker in Ethanol bewies; außerdem erkannte er, daß sich Hefen vermehrten. In seinen Experimenten erhitzte er vier Glasgefäße für 10 Minuten in kochendem Wasser. In den Gefäßen befand sich eine Zuckerlösung, der er Bierhefe zugesetzt hatte (Abbildung 25). In zwei Gefäße wurde anschließend Luft über ein Glasrohr eingeleitet, das bis zum Glühen erhitzt worden war, so daß alle Keime, die sich möglicherweise im Luftstrom befunden haben, abgetötet wurden. In den beiden anderen Gefäßen wurde der Luftstrom nicht erhitzt. Nach Einleiten der erhitzten beziehungsweise nicht erhitzten Luft wurden alle Gefäße luftdicht verschlossen. Als Ergebnis der Versuche zeigte sich, daß nach 4–6 Wochen in den Gefäßen, die nicht erhitzte Luft erhalten hatten, eine Gärung begann; in den Gefäßen, in die zuvor erhitzte Luft eingeleitet worden war, konnte auch nach 12 Wochen noch keine Umwandlung von Zucker in Ethanol beobachtet werden. Die alkoholische Gärung ließ sich auch mit Stoffwechselgiften (Arsen) verhindern. Er schloß aus den relativ einfachen, aber eindeutigen Experimenten, daß «Zuckerpilze» für die Vergärung von Zucker in Ethanol und Kohlendioxid verantwortlich sind.

Die Ansicht, daß kleine Organismen diese Umwandlung der Stoffe verursachen, wurde von den bedeutendsten Chemikern jener Zeit abgelehnt. Auch Justus von Liebig (1803–1873) bekämpfte die «Organismen-Hypothese»; nach seiner Meinung waren Gärungen «eine molekulare Bewegung», die ein in chemischer Bewegung, das heißt in Zersetzung begriffener Körper auf andere

überträgt, deren Elemente nicht sehr Zusammenhängen. Die Ursache wurde als Ferment bezeichnet, das aber nicht als Organismus angesehen wurde. Nach der Formulierung von Ernst Hallier (1867) ließ sich das Agens beziehungsweise Ferment folgendermaßen beschreiben:

> *Dieses Agens konnte man, solange man seine Natur nicht kannte, als ein unorganisches oder wenigstens nicht organisiertes ansehen, welches gewissermaßen die Zersetzung auslöste, anregte, ähnlich wie kleine Erschütterungen eine bis unter den Gefrierpunkt abgekühlte Wassermasse plötzlich zum Gefrieren bringen und wie krystallisierbare Flüssigkeiten leichter zu Krystallisation kommen, wenn die in der Luft befindlichen Stäubchen auf die Oberfläche herabfallen.*

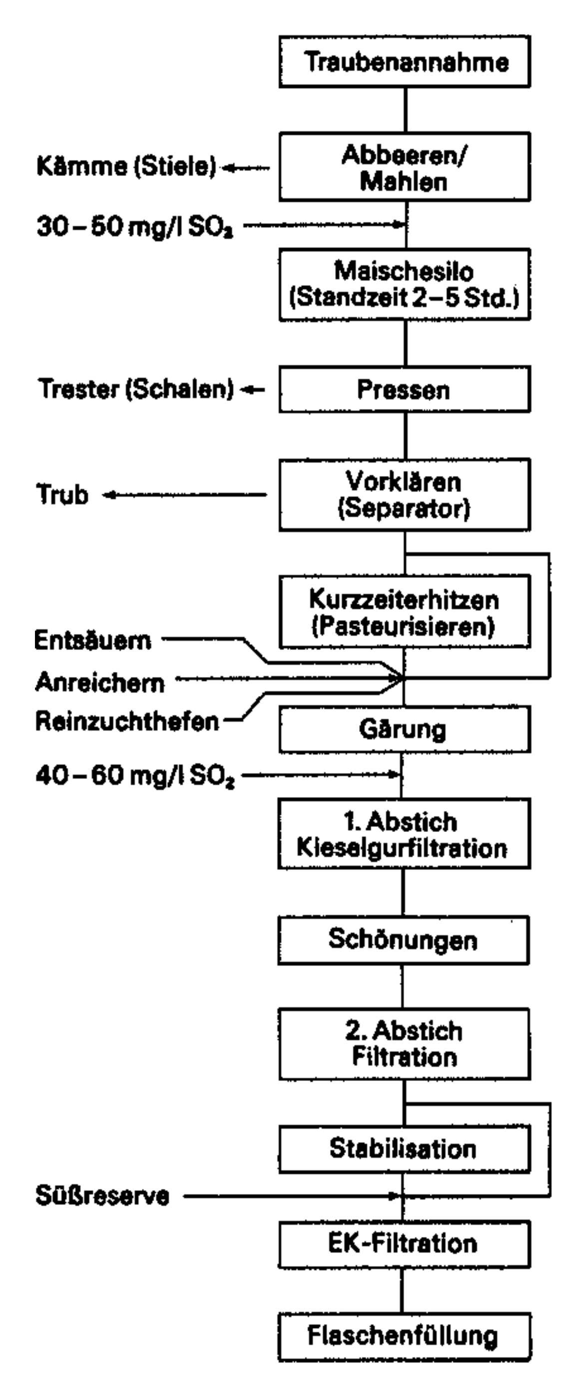
Die Diskussion über die Natur der alkoholischen Gärung wurde durch die umfassenden Untersuchungen (1857–1876) von Louis Pasteur und seine Veröffentlichung im Jahre 1860 weitgehend beendet, als er eindeutig nachweisen konnte, daß auch in einer zuckerhaltigen Nährlösung, die kein Eiweiß enthielt, während der Ethanolbildung die Zahl der Hefekügelchen zunahm, somit ein Wachstum stattfand.

Alkoholische Getränke

Weinherstellung.

Bei der Bereitung von *Wein* wird die Glucose und Fructose im Traubenmost hauptsächlich durch *Saccharomyces cerevisiae* var. *ellipsoides* und Stämme von *Saccharomyces bayanus* unter sauerstofffreien Bedingungen direkt zu Ethylalkohol (Ethanol) und Kohlendioxid vergoren. Bei Spontangärungen sind auch die Hefe *Kloeckera* und andere Hefen von Bedeutung. In großen Betrieben arbeitet man heute fast ausschließlich mit Reinzuchthefen, Kulturhefen, die nach ihren Gäreigenschaften ausgewählt und optimiert wurden.

Abbildung 26: Schematische Darstellung der Weißweinbereitung (EK-Filtration = Entkeimungsfiltration mit Filtern, durch die alle Mikroorganismen zurückgehalten werden).



Zur Herstellung von Wein werden zuerst die entstielten Beeren gemahlen beziehungsweise zerquetscht, mit Schwefeldioxid (SO_2) versetzt (geschwefelt); es entsteht die Maische (Abbildung 26). Nach zwei bis fünf Stunden wird der Saft (=Most) von den festen Bestandteilen (= Treber) abgepreßt. Durch eine Zugabe von Zucker (Trockenzuckerung) kann der Most in manchen Fällen *angereichert* werden, so daß in der folgenden Gärung durch den höheren Zuckergehalt mehr Ethanol entsteht. Durch eine Zugabe von Calciumcarbonat läßt sich bei einem Most, der zu viel Säure enthält, auch eine teilweise *Entsäuerung* erreichen.

In der anschließenden Vergärung der Zucker entstehen neben Ethanol und Kohlendioxid bis zu 300 flüchtige Nebenprodukte, dazu nichtflüchtige Verbindungen (Extraktstoffe), die den Geruch und den Geschmack bestimmen. Der junge Wein wird meist sofort geschwefelt (SO_2), um einen Oxidationsschutz zu erreichen und das Wachstum von Milchsäure- und Essigsäurebakterien zu unterdrücken. Es schließen sich Klärung, Filtration und Schönung an, um den Wein von Trübstoffen zu befreien und ihn zu stabilisieren.

Die «Restsüße» im Wein bleibt bei den «Auslese»-Weinen zurück, da die Hefen bei sehr hohem Zuckergehalt nicht allen Zucker vergären können.

In den normalen Weinen kann der mildere Geschmack durch Zusatz von sterilem, unvergorenem Traubenmost erreicht werden. Einen weicheren Geschmack des Weines erhält man auch, wenn nach der Hefegärung eine zweite Gärung mit bestimmten Milchsäurebakterien (*Oenococcus oenos*) angeschlossen wird.

Die Milchsäurebakterien wandeln die Apfelsäure des Weins in Milchsäure um, die weniger sauer ist.

Zur Bereitung von Rotwein müssen die Farbstoffe (Anthocyane) aus den Beerenhäuten der roten Trauben herausgelöst werden. Das läßt sich durch eine kurze Vorgärung in der Maische (vor der Abtrennung der Beerenschalen) durch den dabei gebildeten Alkohol erreichen. Anschließend wird der rote Most zur weiteren Vergärung abgepreßt. Die weitere Behandlung verläuft wie bei der Herstellung von Weißwein.

Die Rotfärbung des Weins kann auch durch eine kurze Erhitzung (circa 75 °C) der Maische erhalten werden.

Bierherstellung.

Ein «echtes» Bier darf nach dem deutschen Reinheitsgebot nur aus Gerstenmalz, Hopfen und Wasser durch eine alkoholische Gärung mit Hefen hergestellt werden. Dieses Gebot ist das älteste Lebensmittelgesetz der Welt; es wurde 1516 von Herzog Wilhelm IV. von Bayern erlassen, um die Verfälschungen des Getränks zu unterbinden, wahrscheinlich aber auch, um mehr Steuern einzunehmen. Dem Bier wurde die Grut zugegeben, ein Gemisch verschiedener Kräuter, zum Beispiel Wacholder, Schlehe, Wermut, Kümmel, aber auch Eichenrinde, Pech, Ochsengalle, Ruß, Kreide und Bilsenkraut. Einige Kräuter waren sehr giftig oder erzeugten Halluzinationen. Seit dem späten Mittelalter wird dem «echten» Bier nur Hopfen zugesetzt.

«Bierhefen» können die Stärke der Gerste nicht direkt verwerten. Vor der alkoholischen Gärung wird daher die Stärke aufgeschlossen, das heißt enzymatisch in kürzere Bruchstücke zerlegt. Dazu werden die Gerstenkörner zum Quellen und Keimen gebracht (= *Mälzen*); durch diese Behandlung wird das in den Körnern vorhandene inaktive, Stärkeabbauende Enzym Amylase wieder aktiv. Die Keimung dieses *Grünmalzes* unterbricht man durch Hitze und Wasserentzug in der *Darre*, ohne daß die Enzyme geschädigt werden. Je nach Darrtemperatur entstehen (durch Röst- und Farbstoffe) helle oder dunkle

Darrmalze, die dem fertigen Bier einen bestimmten Geschmack und den Farbton verleihen. Das Darrmalz wird geschrotet, mit Wasser gemischt, in Maischbottiche gegeben. Dort laufen bei einer bestimmten Temperatur enzymatische Reaktionen in dieser *Maische* ab, hauptsächlich ein Abbau der Stärke und teilweise auch von Proteinen. Die Stärke wird überwiegend zu dem Disaccharid Malzzucker (Maltose) gespalten, der sich aus zwei Glucosemolekülen zusammensetzt.

Nach dem Entfernen der festen Rückstände (= *Treber*) wird die so gewonnene *Würze* zur Inaktivierung aller Enzyme und zur Eiweißausfällung gekocht, außerdem mit Hopfen versetzt, der dem Bier einen bitteren Geschmack verleiht und die Haltbarkeit verbessert. Die Würze wird filtriert und dann auf die Temperatur des Gärkellers abgekühlt. Vor der alkoholischen Gärung muß die Würze dann noch auf den gewünschten Extraktgehalt verdünnt werden. Der Extraktgehalt, die Konzentration an vergärbaren Zuckern und den anderen Inhaltsstoffen der Würze, ist um so höher, je stärker (alkoholreicher) das Bier sein soll. Die verdünnte Würze (Stammwürze) wird dann in die Gärbottiche oder in Fermenter geleitet. Zur Vergärung der Zucker setzt man bestimmte Kulturstämme der Hefe *Saccharomyces cerevisiae* ein, die in der Natur nicht Vorkommen. Die Bierhefen sind heute meistens «untergärige» Hefen, die sich bei der Gärung (Temperaturen von 5–10 °C) auf dem Boden der Gärbottiche absetzen. «Untergärige Biere» sind beispielsweise Exportbier, Lagerbier, Bockbier und Pils. Andere Biersorten werden mit «obergärigen» Hefestämmen bei höheren Gärtemperaturen (12–22 °C) angesetzt; dabei entwickelt sich mehr Kohlendioxid, und die Hefezellen bleiben nach der Gärung hauptsächlich an der Oberfläche.

«Obergärige Biere» sind beispielsweise Altbier, Ale, Porter und Berliner Weiße.

Biologische Bierfehler können durch «wilde Hefen» (*Saccharomyces pasteurianum*), *Milchsäure*- und *Essigsäurebakterien* entstehen. Gefürchtet ist die «Sarcinakrankheit» durch *Pediococcus cerevisiae*, die dem Bier einen (durch Diacetylbildung) sehr unangenehmen Geschmack verleiht. In einigen Bierarten ist wiederum eine zusätzliche Milchsäuregärung erwünscht, um dem Bier einen frischen, säuerlichen Geschmack zu geben.

Die älteste Überlieferung der Bierbereitung wurde auf Tontafeln aus dem 4. Jahrtausend vor Christus im Land der Sumerer gefunden. Die Sumerer lebten im Zweistromland zwischen Euphrat und Tigris. In der Anfangszeit der Bierherstellung war wahrscheinlich nicht gemälztes Getreide (Emmerweizen, Gerste), sondern eingeweichtes Fladenbrot die stärkehaltige Grundsubstanz. So könnte auch die «Erfindung» des Bieres zufällig erfolgt sein, als Fladenbrot zu lange eingeweicht wurde und in Gärung überging. Es ist nicht anzunehmen, daß bei der frühen Bierbereitung nur Hefen beteiligt waren. Sicherlich befanden sich in den Ansätzen auch Milchsäurebakterien und teilweise auch Essigsäurebakterien, die dem Bier einen säuerlichen Geschmack verliehen. Bierbrauen war anfangs Frauensache, es wurde erst zur «echten Männersache», als sich die christlichen Mönche dieses geistigen Getränks annahmen.

Welch überragende Bedeutung Bier seit Jahrtausenden hat, läßt sich auch am «Gilgamesch-Epos» erkennen. In dieser Sage, die im 3. Jahrtausend vor Christus niedergeschrieben wurde, wird der in der Steppe lebende, grasfressende Urmensch Enkidu erst durch den Genuß von Bier und Brot zum «echten» Menschen. Die Babylonier, die Nachfolger der Sumerer im Zweistromland, brauten bereits 20 verschiedene Biersorten. Im Kodex Hammurabi, der ältesten Gesetzessammlung der Welt (circa 1800 vor Christus), sind auch Anordnungen über die Herstellung und Verteilung von Bier enthalten.

Zur Verzuckerung von Stärke wird bei der Bierherstellung die Amylase der keimenden Gerste genutzt. Beim traditionellen japanischen «Reiswein» Sake, einem bierähnlichen Getränk mit Reis als Grundstoff, wird dagegen Pilz-Amylase verwendet. Dazu werden der Stärke (eingeweichte, gedämpfte Reiskörner) Sporen des Schimmelpilzes *Aspergillus oryzae* zugesetzt, die sich auf dem Reis entwickeln und ein Mycel ausbilden (= *Koji*). Die wachsenden Pilze scheiden verschiedene Enzyme aus, hauptsächlich Amylasen und eiweißspaltende Peptidasen. Ein Teil des «verschimmelten» Reises wird nach 5–6 Tagen mit Hefen (*Saccharomyces sake* = *Saccharomyces cereviseae* var. *sake*) beimpft; diesem Fermentationsstarter (= *Moto*) wird weiterer Koji und erneut ein spezieller gedämpfter und gekochter Reis zugemischt. In dieser Maische (= *Moromi*) beginnt auch die Verzuckerung der Stärke des neu zugefügten Reises durch die Pilzenzyme, und gleichzeitig oder nachfolgend findet eine alkoholische Gärung durch die Hefen statt; außerdem können Milchsäure oder Milchsäurebakterien zur Unterdrückung von Fäulnisbakterien zugegeben werden.

Nach etwa drei Wochen Fermentation erfolgt nach einer Filtration, Kurzzeiterhitzung (Pasteurisation) und weiterer Nachbehandlung die Abfüllung. Durch die lange Fermentation, unter Beteiligung der verschiedenen Mikroorganismen, werden sehr unterschiedliche Aroma- und Duftstoffe gebildet (Ethanol, höhere Alkohole, Amino- und organische Säuren sowie verschiedene Ester), die für Sake charakteristisch sind.

Ein beliebtes altes russisches Getränk ist Kwas, von dem es über 50 Sorten gibt. Es ist eine Art Dünnbier (0,5–1,5 % Alkohol), das durch eine gleichzeitig ablaufende saure und alkoholische Gärung von Milchsäurebakterien und Hefen entsteht. Zutaten sind Mehl verschiedener Getreidearten (Weizen, Roggen, Gerste, Buchweizen), Malz von diesen Getreidearten oder auch eingeweichtes Brot; außerdem können noch Zucker oder zuckerhaltige Naturprodukte und würzende Zusätze, zum Beispiel Pfefferminze oder verschiedene Obstsorten, zugegeben werden.

Das in Ägypten und im Altertum gebraute Bier wird wahrscheinlich dem milchsauren, schwach alkoholischen Kwas im Geschmack sehr ähnlich gewesen sein.

Es gibt in Asien und in Amerika eine Reihe weiterer wichtiger Nahrungsmittel, bei deren Herstellung Pilze eine wichtige Rolle spielen (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Einige wichtige Nahrungsmittel, die mit Pilzen fermentiert werden (nach Weber, 1993, modifiziert)

Name	Rohstoff	Pilzart	Verwendung	Ursprungsland
Tempeh (Kedelai)	Sojabohnen	*Rhizopus oligosporus*	Nahrungsmittel	Indonesien
Oncom	Erdnußpreßkuchen	*Rhizopus oligosporus*, *Neurospora sitophila*	Nahrungsmittel	Indonesien
Bonkrek (Tempeh bonkrek)	Kokosnußpreßkuchen	*Rhizopus oligosporus*	Nahrungsmittel	Indonesien
Sojasauce (Shoyu)	Sojabohne, Weizen	*Aspergillus oryzae*, Hefen, Bakterien	Würzmittel	Ostasien
Miso (Sojapaste)	Sojabohnen	*Aspergillus oryzae*, Hefen, Bakterien	Würzmittel, Suppeneinlage	Ostasien (Japan)
Arroz requemado	Reis	*Aspergillus flavus*, *Aspergillus candidus*	Nahrungsmittel	Ecuador
Pozol (Masa)	Mais	Schimmelpilze, Hefen, Bakterien	Nahrungsmittel	Mexiko
Angkak	Reis	*Monascus purpureus*	Färbung von Nahrungsmitteln	Ostasien
Sufu	Sojabohnen	*Actinomucor elegans*, *Rhizopus oligosporus*	Nahrungsmittel	Ostasien

Pilze als Quelle für Antibiotika und andere Medikamente

Der Durchbruch in der selektiven Bekämpfung der mikrobiellen Krankheitserreger gelang, als zufällig entdeckt wurde, daß Schimmelpilze Stoffe absondern, die andere Mikroorganismen hemmen. Diese Verbindungen werden *Antibiotika* genannt; es sind Substanzen von Mikroorganismen, die schon in sehr *geringer Konzentration* das Wachstum von anderen Mikroorganismen hemmen oder sie abtöten. Heute werden auch Hemmstoffe biologischer Herkunft, die nicht von Mikroorganismen gebildet werden, als Antibiotika bezeichnet.

Der große Vorteil vieler Antibiotika liegt darin, daß sie auf lebensnotwendige biochemische Stoffwechselreaktionen und auf Strukturen einwirken, die spezifisch für Bakterien (Prokaryoten) sind und beim Menschen und den anderen kernhaltigen Organismen (Eukaryoten) eine andere Struktur besitzen oder nicht Vorkommen. Antibiotika hemmen oder töten Mikroorganismen auf

verschiedenen Wegen: Sie greifen in die Zellwandbildung ein, zerstören die Cytoplasmamembran, verhindern die Proteinsynthese oder stören den Stoffwechsel der Nucleinsäuren.

Es sind etwa 5000 verschiedene Antibiotika bekannt, von denen etwa 100 therapeutisch verwertbar sind; etwa 20 % werden aus Pilzen gewonnen, Arten des Pinselschimmels (*Penicillium*), Gießkannenschimmels (*Aspergillus*) sowie von *Cephalosporium*-Arten. Die meisten Antibiotika-Bildner findet man jedoch bei den *Streptomyceten* und einigen anderen Bakterien (zum Beispiel *Bacillus*-Arten).

Die meisten Antibiotika-Bildner leben im Erdboden, in dem sich auch Antibiotika nachweisen lassen. Es ist daher möglich (aber noch nicht eindeutig bewiesen), daß unter natürlichen Bedingungen durch Ausscheidung dieser «Kampfstoffe» ein Selektionsvorteil für Wachstum und Vermehrung dieser Mikroorganismen besteht.

Wie viele bedeutende Entdeckungen in Biologie und Medizin wurden auch die Antibiotika zufällig gefunden. Der schottische Arzt und Bakteriologe Alexander Fleming (1881–1955) beobachtete 1928 (1929 veröffentlicht) auf alten Nährplatten, die mit dem bakteriellen Eitererreger *Staphylococcus aureus* beimpft worden waren, Verunreinigungen mit Pilzkolonien. Keine Besonderheit, aber um diese Pilzkolonien wuchsen keine Bakterien, es hat sich ein Hemmhof gebildet. Fleming schloß aus dieser Beobachtung, daß die Pilze eine Substanz abgegeben hatten, die das Wachstum der Bakterien hemmen konnte. Er nannte den Pilz *Penicillium rubrum*, später als *Penicillium notatum* bestimmt. Der Hemmstoff wurde nach dem Gattungsnamen als Penicillin bezeichnet. Die Hemmhöfe im Bakterienrasen wurden von Fleming wohl zufällig beobachtet; er wäre aber wahrscheinlich nicht zur richtigen Schlußfolgerung gekommen, wenn er sich nicht bereits zuvor mit Stoffen beschäftigt hätte, die zur Bekämpfung von Krankheitserregern geeignet schienen.

Penicillin verhindert, daß Bakterien beim Wachstum eine neue Zellwand aufbauen können und so durch den Zellinnendruck platzen.

Fleming hatte wohl Penicillin entdeckt und seine Beobachtungen veröffentlicht, aber diese Substanz, die das Wachstum der Bakterien hemmt, nicht gereinigt und auf ihren Nutzen als Medikament getestet. Die Isolation und Anreicherung des Penicillins war sehr schwierig und gelang erst über zehn Jahre später durch Ernst B. Chain und Howard Florey (Oxford University, 1939).

Florey testete das Antibiotikum an Mäusen und dann auch am Menschen. Er konnte dabei nachweisen, daß beim Menschen keine toxischen Nebenwirkungen auftraten. Beim Test mit weißen Mäusen (1940), die mit virulenten *Streptococcus*-Bakterien infiziert worden waren, erhielt ein Teil der Tiere Penicillin, die übrigen bekamen kein Antibiotikum. Nach 16 Stunden waren alle Mäuse tot, denen kein Penicillin gegeben worden war; von den 25 mit dem Antibiotikum behandelten blieben 24 am Leben.

Die ersten Versuche an einem Polizisten mit einer schweren Blutvergiftung durch *Staphylococcus aureus* (1941, Saint Mary's Hospital in London) waren vielversprechend, den Ärzten ging jedoch das Antibiotikum aus, und der Patient starb. Die folgenden Behandlungen weiterer Patienten waren jedoch

äußerst erfolgreich, und es begann der Siegeszug des Penicillins als Wunderwaffe gegen Infektionen. In dieser Zeit setzte man Penicillin hauptsächlich gegen Syphilis, die bakterielle Hirnhautentzündung (Meningitis) und Lungenentzündungen ein. Nach Ausbruch des Zweiten Weltkriegs wurde die Penicillinherstellung in den USA zum kriegswichtigen Ziel erklärt. Es begann die großtechnische Produktion, hauptsächlich, um Infektionen von im Krieg verwundeten Soldaten behandeln zu können.

Normalerweise werden Penicillin-Verbindungen vom Menschen gut vertragen, doch etwa 10 % der Menschen sind gegen dieses Antibiotikum allergisch; die Allergie kann sogar zum Tode führen.

1945 erhielten die Pioniere der Antibiotika-Forschung den Nobelpreis, Fleming für seine Entdeckung, Chain für die chemische Aufklärung und Florey für die Versuche zur medizinischen Anwendung.

Mit dem Erfolg der Penicillinbehandlung begann in der ganzen Welt die Suche nach *Penicillium*-Arten, die höhere Mengen an Penicillin bilden, und nach weiteren Mikroorganismen, die auch Antibiotika produzieren.

Viele der noch heute für die Penicillin-Herstellung verwendeten Stämme sind Abkömmlinge von *Penicillium chrysogenum*. Dieser Pilz wurde von einer angeschimmelten Honigmelone isoliert, die von einem Markt in Peoria (Illinois) stammt.

Zur großtechnischen Produktion wurde die Synthese der Antibiotika in den Mikroorganismen durch die Auswahl von natürlichen und künstlichen Mutanten sowie einer Optimierung der Kulturbedingungen stark erhöht. Im Vergleich zu den Ursprungsstämmen ist die Synthese von Penicillin und anderer Antibiotika bei den heutigen Zuchtstämmen um ein Vielfaches (oft mehr als tausendfach) erhöht.

Mit der Entdeckung des Penicillins und anderer therapeutisch anwendbarer Antibiotika begann ein neues Zeitalter für die Bekämpfung von Krankheiten, was zu einem gewaltigen Aufschwung einer neuen biologisch-technischen Industrie geführt hat.

Abbildung 27: Penicillin G und Angriffspunkt der Penicillinase von penicillinresistenten Bakterien; durch dieses Enzym wird der β-Lactamring gespalten und dadurch die Wirkung des Antibiotikums aufgehoben.

Auch wenn sehr viele Krankheitserreger gegen Penicillin und Penicillin-Abkömmlinge unempfindlich geworden sind, können sie weiterhin bei sehr vielen Erkrankungen erfolgreich angewandt werden. Ursache für die Resistenz der Bakterien gegen Penicillin ist ein bakterielles Enzym (Penicillinase), das das Penicillinmolekül am β-Lactamring aufschneidet und so unwirksam macht (Abbildung 27). Die Gene für dieses Enzym liegen auf einem Plasmid, einem

kleinen, ringförmigen DNS-Faden in der Bakterienzelle; so können die Resistenzgene leicht an andere Bakterien weitergegeben werden.

Antibiotika werden nicht nur in der Human- und Tiermedizin eingesetzt, sondern auch als Futtermittelzusatz, im Pflanzenschutz und früher auch zur Konservierung von Lebensmitteln verwendet. Als Tierfutterzusatz sind nur noch wenige Antibiotika zugelassen. Es wird versucht, in der EU ein vollständiges Verbot zu erreichen, um die Verbreitung von Bakterien zu verhindern, die durch das antibiotikahaltige Futter Resistenzgene erwerben können.

Pilze und Pilzprodukte wurden bereits vor unserer Zeit, lange bevor Antibiotika als Hemmstoffe wissenschaftlich erkannt waren, zur Behandlung von Krankheiten oder Wunden genutzt. Es ist überliefert, daß vor 3000 Jahren in China Furunkel und andere Infektionen auf der Haut mit verschimmeltem Sojabohnen-Quark bedeckt wurden. In Ägypten gab es im 16. Jahrhundert vor Christus die Empfehlung, oberflächliche Verletzungen mit zerriebenem verschimmeltem Brot zu behandeln, um eine Heilung zu beschleunigen. Auch aus Frankreich ist bekannt, daß verschimmelter Käse zur Behandlung von Wunden genutzt wurde. Es ist sehr wahrscheinlich, daß in allen diesen Fällen Penicillin die Ursache für die Heilwirkung gewesen ist.

Ein weiteres in der Medizin eingesetztes lebenswichtiges Produkt aus verschiedenen Schimmelpilzen (*Cylindrocarpon lucidum* und *Tolypocladium inflatum*) ist Cyclosporin, ein Medikament, das die Abstoßung implantierter Organe, zum Beispiel bei Herzübertragungen, unterdrückt. Auch die in großem Umfang eingesetzten Blutfett-Senker, die Statine, die den Cholesterinspiegel im Blut erniedrigen (zum Beispiel Simvastatin), sind pilzliche Stoffwechselprodukte. Ihre Wirkung beruht auf einer Hemmung der Cholesterin-Synthese, die durch eine Blockierung eines notwendigen Enzyms (3-Hydroxy-3-methyl-glutaryl-coenzym-A-Reduktase) in der Leber erfolgt.

Die meisten Statine werden aus mehreren Schimmelpilzen gewonnen, beispielsweise aus *Penicillium*-, *Hypomyces*- und *Paecilomyces*-Arten; biotechnologisch wird besonders *Aspergillus terreus* verwendet.

Weiß- und Blauschimmelkäse

Käse sind frische oder in verschiedenen Graden der Reife befindliche Erzeugnisse aus dickgelegter Käsereimilch (Definition in der deutschen Käseverordnung). Unter Dicklegung versteht man eine Ausfällung des Milcheiweißes (Casein) durch eine Ansäuerung der Milch mit Milchsäurebakterien (= Sauermilchkäse) oder eine bakterielle Ansäuerung mit zusätzlicher Fällung durch eiweißabbauende Enzyme (= Labkäse). Die enzymatische Ausfällung des Caseins erfolgt hauptsächlich mit Lab, einem Enzymgemisch aus Kälbermagen mit dem Hauptenzym Chymosin. Chymosin wird heute auch biotechnologisch aus gentechnisch veränderten Pilzen (*Kluyveromyces lactis*, *Aspergillus niger* var. *awamori*) oder auch aus *Escherichia coli* K-12 gewonnen. Dieses gentechnisch gewonnene Enzym ist weitgehend mit dem Kälberlab identisch. Ähnliche Wirkung wie Lab haben auch Enzyme aus Schimmelpilzen (zum Beispiel *Mucor*-Arten), der Abbau des

Caseins verläuft jedoch etwas anders als mit Lab. Auch pflanzliche Enzyme können zur Fällung des Caseins genutzt werden, beispielsweise Labkraut (*Galium verum*) oder Feigensaft.

Der Ursprung der Käseherstellung liegt im Nahen Osten. Möglicherweise war Käse bereits 6500–5000 vor Christus in Mazedonien und Thessalien und anderen Kulturen bekannt, wo Weide- und Milchwirtschaft gepflegt wurde. In Europa war die Kunst des Käsemachens wahrscheinlich schon 2800 vor Christus verbreitet. In der Bibel wird Käse als Nahrung der Helden erwähnt. Im Römischen Reich bestand bereits eine Käseindustrie.

Zur Käseproduktion werden hauptsächlich verschiedene Milchsäurebakterien eingesetzt. Diese Bakterien scheiden in ihrem Gärungsstoffwechsel beim Abbau von Milchzucker Milchsäure aus, die die Milch ansäuert. Dadurch fällt das Milcheiweiß (Casein) aus, und gleichzeitig wird das Wachstum von Fäulnisbakterien unterbunden. Schimmelpilze spielen dagegen erst bei der Reifung einiger wichtiger Käsesorten, nach Formung der Käselaibe, für die Bildung von Geschmacks- und Aromastoffen eine überragende Rolle; außerdem wird durch den Stoffwechsel der Pilze die Konsistenz der Käse in typischer Weise verändert.

Aber in allen Käsen, auch bei Schimmelkäsen, tragen die Milchsäure- und andere typische Käsebakterien durch ihren Eiweißabbau gleichfalls zur Geschmacksbildung bei.

Zur Produktion der Weichkäse mit Schimmelreifung auf der Käseoberfläche werden Pilzkonidien meist bereits zu Beginn der Käseherstellung zugegeben, nachdem die Käsemilch mit Milchsäurebakterien (= Starterkulturen) beimpft wurde. Bei Labkäsen wird anschließend noch Lab eingemischt. Dieses Enzym bewirkt einen teilweisen Abbau des Caseins und verstärkt damit die Gerinnung dieses Eiweißes. Es bildet sich eine geschmacklose Gallerte aus vernetzten Proteinen, von der sich bereits Flüssigkeit, die Molke, abtrennt. Nach Gerinnung des Milcheiweißes erfolgt ein schonendes Zerkleinern (Schneiden) des ausgefällten Caseins. Die geschnittene Gallerte, der Bruch, wird anschließend in Formen gefüllt. Durch Abtropfen oder leichten Druck trennt man den festen Bruch von der flüssigen Molke. Die so entstandenen Käselaibe werden aus den Formen genommen, mehrfach gewendet, gesalzen, dann im Trockenkeller und anschließend im Reifekeller gelagert. In einigen Fabrikationsverfahren werden die *Penicillium*-Konidien nicht der Käsemilch, sondern erst dem Bruch zugegeben oder auch auf die rohen Käselaibe gesprüht. Während der Reifung der Weißschimmelkäse wächst das Pilzmycel nur auf der Oberfläche der Laibe, da die Pilze für ihr Wachstum viel Sauerstoff benötigen. Bei der Reifung dringt das Mycel nicht in den Käse ein; es werden aber eiweiß- und fettabbauende Enzyme in die Käsemasse abgegeben, durch deren Tätigkeit eine Reihe von Aromastoffen gebildet werden, die den verschiedenen Weißschimmelkäsen ihren charakteristischen Geschmack verleihen. Der Abbau des Caseins erfolgt teilweise bis zu den Aminosäuren; je umfangreicher der Abbau verläuft, um so flüssiger und aromatischer wird die Käsemasse.

Zur Herstellung der Weißschimmelkäse, zum Beispiel Camembert und Brie, werden Stämme von *Penicillium camemberti* und *Penicillium candidum* verwendet.

Neben der Aromabildung sind die Schimmelpilze auch an der Entsäuerung der Käsemasse beteiligt und gewähren einen Schutz vor der Besiedlung von anderen, auch pathogenen Mikroorganismen an der Käseoberfläche. In Spätstadien der Reife können sich auf der Oberfläche vom Camembert auch die rötlichen Schmierebakterien (*Brevibacterium linens*) ansiedeln.

Im Gegensatz zu den Weißschimmelkäsen wächst bei Blauschimmelkäsen das Pilzmycel während der Reifung im Innern der Käse. Als Blauschimmel oder Edelschimmel werden Stämme von *Penicillium roqueforti* (ein häufiger Brotschimmel) oder *Penicillium gorgonzola* eingesetzt. Die bekanntesten Blauschimmelkäse sind der milde, sahnige italienische Gorgonzola sowie der berühmte englische Stilton (beide aus Kuhmilch) und der kräftige, stark gesalzene französische Roquefort-Käse. Dieser halbfeste Schnittkäse wird aus Schafsmilch hergestellt. Der Pilz wird oft auf Brot vorgezüchtet und der geformte Käsebruch mit der trockenen, blaugrünen Konidiensuspension (Blaupulver) des Pilzes eingestäubt. In anderen Fabrikationsverfahren werden die Konidien des Pilzes bereits in die Kesselmilch gegeben. Eine Besonderheit des echten Roquefort-Käses ist seine Reifung in den Berghöhlen von Combalou in der Nähe der Stadt Roquefort. Da sich der Blauschimmel im Inneren der Käse entwickelt, werden die Käselaibe vor der Einlagerung mit Nadeln durchstochen (pikiert), damit die Pilze genügend Sauerstoff zum Wachstum erhalten.

Eine deutsche Käsespezialität aus Kuhmilch ist der Bavaria blu, zu dessen Reife ein Weißschimmel an der Oberfläche und der Blauschimmel in den Laiben wächst.

Es gibt viele andere Weiß- und Blauschimmelkäse in den verschiedenen Regionen Europas und in außereuropäischen Ländern; immer sind an der Reifung Stämme beziehungsweise Rassen der vier *Penicillium*-Arten beteiligt. Einige Systematiker nehmen aber an, daß alle Weißschimmel, die zur Käseherstellung genutzt werden, Abkömmlinge von *Penicillium camemberti* sind und daß alle Blauschimmel im Käse von *Penicillium roqueforti* abstammen.

Die Schimmelpilze bilden normalerweise unter den üblichen Produktionsbedingungen der Käse entweder keine oder so geringe Konzentrationen schädlicher Mykotoxine, daß sie für den Menschen unbedenklich sind.

Eine untergeordnete, aber trotzdem wichtige Rolle bei der Reifung von Schimmelkäsen spielen noch andere Pilze, die vor dem Auftreten des *Penicillium*-Mycels die Oberfläche besiedeln.

Auf frischem Käse wachsen besonders Hefen (zum Beispiel *Candida*- und *Kluyveomyces*-Arten) sowie der Milchschimmel (*Geotrichum candidum* = *Galactomyces geotrichum* = *Oospora lactis* = *Oidium lactis*). Diese Pilze stammen aus den Käsekellern und kommen auf natürlichem Wege über die Luft oder von den Kellerregalen auf die Käse. Auch diese Oberflächenkulturen tragen durch einen Abbau von Casein und Fetten zur Aromabildung bei,

außerdem entsäuern sie den Käse, dadurch können auch säureempfindliche Mikroorganismen auf der Oberfläche wachsen. So ist die Besiedlung mit den Schmierebakterien (*Brevibacterium linens*), die für die Reifung von Rotschmierekäse (zum Beispiel Romadur, Münster-Käse) charakteristisch sind, erst nach einem Säureabbau möglich. Durch die Entsäuerung wird auch die Aktivität einiger Enzyme gefördert. Außerdem werden die Reste an Milchzucker abgebaut und Vitamine gebildet, die das Wachstum anderer Käse-Mikroorganismen beschleunigen.

Hefen spielen auch, neben den Milchsäurebakterien, bei der Herstellung einer Reihe von Sauermilchprodukten, zum Beispiel Kefir, eine wichtige Rolle. Sie verleihen den joghurtartigen Produkten durch die Bildung von Kohlendioxid und geringen Mengen an Ethanol einen prickelnden, frischen Geschmack.

Einzeller-Proteine

Da Mikroorganismen besonders schnell wachsen und einen hohen Proteingehalt besitzen, sind eine Reihe von Verfahren entwickelt worden, um Bakterien sowie Hefen und andere Pilze direkt als Proteinlieferanten zu züchten. Die Kultur erfolgt auf landwirtschaftlichen Abfall- und industriellen Nebenprodukten oder auf Komponenten des Erdöls.

Als Zusatz zu Viehfutter sind Proteine von Mikroorganismen gut geeignet. Als menschliche Proteinnahrung sind sie dagegen normalerweise erst nach besonderer Aufarbeitung nutzbar. Es kann sonst beim Menschen durch Zellwandkomponenten zu Verdauungsstörungen sowie allergischen Reaktionen und durch den hohen Nucleinsäuregehalt der Mikroorganismen zu einer Anhäufung von Harnsäure im Körper kommen. Harnsäure führt zur Bildung von Gallensteinen und verursacht gichtartige Erkrankungen. Diese Säure entsteht aus Nucleinsäuren und reichert sich an, da dem Menschen das harnsäureabbauende Enzym Uricase fehlt.

Die «British Petroleum Corporation» ließ im industriellen Maßstab die Hefe *Candida lipolytica* auf wäßrigen Emulsionen von Rohöl kultivieren; dadurch wird das Erdöl leichter raffinierbar, und gleichzeitig wird Protein gewonnen. Die Produktion wurde jedoch aus politischen und ökonomischen Gründen eingestellt.

Die einzigen kommerziell hergestellten Nahrungsmittel aus Pilzen sind «Quorn», das aus Mycelien von *Fusarium graminearum*, und «Marmite», das aus Hefezellen gewonnen wird. Quorn kam erst nach etwa 15jähriger Testung 1985 als Ersatz für tierisches Protein in den Handel, schmeckt auch fleischähnlich und wird für strenge Vegetarier empfohlen. Marmite, ein Brotaufstrich, wird aus aufgeschlossenen Hefezellen hergestellt. Beide Nahrungsmittel enthalten viele Vitamine, besonders der B-Gruppe. Sie sind im angelsächsischen Raum verbreitet, aber für den Geschmack von Kontinentaleuropäern sehr gewöhnungsbedürftig.

Gewinnung weiterer organischer Stoffe

In der Biotechnologie dienen Pilze auch zur Gewinnung verschiedener organischer Säuren, beispielsweise Citronensäure für Getränke (*Aspergillus niger*), Äpfelsäure für Getränke und Marmeladen (*Aspergillus flavus*); Pullulan, ein Verdickungs- und Geliermittel, ist auch ein pilzliches Produkt (*Aureobasidium pullulans*). Pilze werden gleichfalls zur Herstellung von β-Carotinen, Steroiden und verschiedenen Enzymen eingesetzt. Eine pilzliche alpha-Amylase dient zur Verzuckerung von Stärke (*Aspergillus oryzae*). Mit Pilz-Cellulasen findet ein hydrolytischer Abbau von Cellulose zu Glucose (*Trichoderma viride*) statt. Mit diesen celluloseabbauenden Enzymen kann Holz teilweise zu Glucose umgewandelt werden; Glucose läßt sich dann mit Hefen oder bestimmten Bakterien zu Ethanol vergären. So könnte Holz in Zukunft zur Gewinnung von flüssigem Brennstoff genutzt werden.

Schimmelpilz-Rennin (*Mucor miehei*) wird als Ersatz von natürlichem Kälberlab für die Herstellung von Labkäse eingesetzt. Pektinasen (*Aspergillus niger*) dienen zur Klärung von Fruchtsäften und Weinen. Pilz-Proteasen, die Eiweiße hydrolysieren, findet man in Waschmitteln und setzt sie in der Lebensmittelindustrie ein, um beispielsweise die Backfähigkeit von Weizenmehl zu verbessern. Auch die pilzlichen Lipasen, die Fett in Glycerin und Fettsäuren spalten, werden als Backhilfsmittel genutzt und in Medikamenten als Verdauungshilfe angeboten.

11. Pilze, die wichtigsten Erreger von Pflanzenkrankheiten

Während bei Tieren und Menschen hauptsächlich Bakterien und Viren Krankheiten auslösen, werden Pflanzen überwiegend von pilzlichen Erregern befallen. Eine Beschreibung der verschiedenen Symptome von Pilzkrankheiten an Pflanzen findet man, schon lange bevor die Ursachen für die Erkrankungen erkannt waren. Bereits in Griechenland und im frühen Ägypten wurden schon Mehltaupilze, Brandpilze und Rostpilze unterschieden. Für die siebenjährigen ägyptischen Plagen war wahrscheinlich auch ein extremer Befall des Getreides mit Rostpilzen (*Puccinia*-Arten) mit verantwortlich.

Im Altertum und Mittelalter wurden Pflanzenkrankheiten und Schäden, dem damaligen Weltbild entsprechend, auf göttliches Wirken beziehungsweise auf eine göttliche Strafe zurückgeführt. Andere Autoren deuteten parasitische Pilze auf Pflanzen auch als eine anormale Bildung und Umwandlung von Pflanzenteilen, die ungünstigen Umweltbedingungen zugeschrieben wurden. So vermutete man, daß die Veränderung des Weizens durch Brand auf starke Klimaschwankungen und «viel Miltau» (Mehltau) zurückzuführen seien.

Auch innere Ursachen wurden für die «Mißgeburten» an den Pflanzen verantwortlich gemacht; A. J. G. K. Batsch (1761–1802) nahm an, daß Pflanzenkrankheiten von der Verderbnis der festen und flüssigen Pflanzenteile herrühren.

Einzelne Forscher führten jedoch Pflanzenkrankheiten bereits auf ansteckende, infektiöse Ursachen zurück. Dem französischen Gelehrten M. Tillet (1714–1791) gelang es 1755, in Feldversuchen die infektiöse Natur des Weizensteinbrandes (*Tilletia caries*) eindeutig nachzuweisen und bereits ein Beizverfahren für eine Bekämpfung zu

entwickeln. Die Natur des ansteckenden Agens war ihm aber unklar.

Die Ansicht, daß Pilze Ursache für die verheerende Kartoffelseuche in Irland seien, wurde nach dem Zusammenbruch der Ernte 1846 von Referent M. J. Berkeley (1803–1887) vertreten. Es dauerte aber noch mehrere Jahre, ehe die Bedeutung von Pilzen als Krankheitserreger von Pflanzen allgemein anerkannt wurde.

Erst als H. A. de Bary (1831–1888), der eine wegweisende Abhandlung über die Entwicklung der Brandkrankheiten (1853) und den Entwicklungszyklus der Kraut- und Knollenfäule (1861) veröffentlichte, setzte sich die Ansicht durch, daß viele Pflanzenkrankheiten durch eine Infektion mit Pilzen verursacht werden.

Pilze dominieren als Erreger der etwa 160 wichtigen Infektionskrankheiten der in Mitteleuropa genutzten Pflanzen. Für etwa 80 % der Pflanzenkrankheiten sind Pilze, für die übrigen Bakterien und Viren verantwortlich. Nach vorsichtiger Schätzung werden 10–20 % der möglichen Erträge durch Pilze vernichtet. Die Schäden an Kulturpflanzen belaufen sich jedes Jahr auf Milliardenbeträge und können auch heute noch Ursachen von Hungersnöten in Entwicklungsländern sein. Häufig werden die Krankheitserreger infolge des ständig wachsenden Waren- und Reiseverkehrs kontinental und interkontinental verschleppt und verursachen erhebliche Schäden in Gebieten, wo sie zuvor unbekannt waren. Der Befall der Kulturpflanzen wird besonders durch die großflächigen Monokulturen begünstigt.

Die wichtigsten Pflanzenkrankheiten sind die *Rost-* und *Brandkrankheiten* sowie der Befall mit *Falschem* und *Echtem Mehltau*. Die schädlichen Pilze leben als Ektoparasiten oder Endoparasiten. Die Ektoparasiten wachsen auf den grünen Pflanzenteilen und dringen nur mit speziellen Organen (Haustorien) in die Pflanze ein. Die Endoparasiten wuchern dagegen im Gewebe der Pflanze; sie wachsen zwischen oder

in den Zellen. Es gibt auch Pilze (nekrotrophe Pilze, Perthophyten), die nur abgestorbene Bereiche der Pflanze besiedeln und nicht in lebendes Gewebe eindringen können. Trotzdem schädigen sie die Pflanzen, da sie Toxine abgeben, die von dem befallenen, abgestorbenen Bereich angrenzende oder auch weit entfernte Gewebe abtöten, so daß ihr Lebensraum von ihnen selber vergrößert wird.

Falscher Mehltau

Falsche Mehltaupilze, aus der Gruppe der Eipilze (Oomyceten), gehören zu den am weitesten verbreiteten Erregern von Pflanzenkrankheiten. Fast alle sind hochgradig spezialisiert und befallen nur eine Wirtspflanzen-Art und nahe Verwandte. Zu diesen parasitischen, pilzähnlichen Organismen gehört der Erreger der Kraut- und Knollenfäule der Kartoffel, der wahrscheinlich um 1840 aus Amerika nach Europa eingeschleppt wurde.

Die in den südamerikanischen Anden heimische Kartoffel kam Mitte des 16. Jahrhunderts nach Europa. In den armen Regionen Großbritanniens, besonders in Irland, wurde sie bald für die meisten Menschen Hauptnahrungsmittel. Durch die günstigen Wachstumsbedingungen der Kartoffeln in dieser Region und das jetzt reichliche Nahrungsangebot wuchs die Bevölkerung rasant. Von 1800 bis 1845 verdoppelte sich die Bevölkerung nahezu von 4,5 auf etwa 8 Millionen. In Irland begannen jedoch im Spätsommer 1845 plötzlich die Kartoffelstauden braun zu werden und abzusterben. Der erste Bericht über diese Kartoffelseuche, ein Brief von Doktor Salter, wurde am 16. August 1845 in der *Gardener's Chronicle and Agriculture Gazette* veröffentlicht. Eine Woche später, am 23. August 1845, erschien diese Zeitung mit der Schlagzeile: «Bei den Kartoffeln ist eine verheerende Seuche ausgebrochen» [frei übersetzt]. Ende 1845 waren etwa drei Viertel der Kartoffelernte in Irland vernichtet. Der verregnete Sommer

1845 und fast ständiger Wind begünstigte den Zusammenbruch der Kartoffelstauden.

Im folgenden Sommer, der wieder sehr feucht war, kam es zu einer fast völligen Vernichtung der Kartoffelernte. Die anschließende Hungersnot führte zu einer Massenauswanderung nach Amerika. Es wird geschätzt, daß die Hungersnot und die dadurch bedingte höhere Anfälligkeit für Krankheiten etwa eine Million Tote gefordert hat; außerdem wanderte etwa die gleiche Zahl an Menschen in die Vereinigten Staaten aus. In den USA leben heute etwa 40 Millionen Menschen irischer Abstammung.

Der katastrophale Zusammenbruch der Kartoffelpflanzen führte zu einer intensiven Suche nach der Ursache der Krankheit. Durch seine Untersuchungen (1845/46) von erkrankten und gesunden Kartoffelpflanzen kam J. M. Berkeley (1803–1887) zu dem Schluß, daß die auf den Kartoffelpflanzen beobachteten Pilze die Ursache und nicht nur die Folge der Krankheit seien. Andere Autoren meinten, die «Überladung» mit Wasser, giftige Ausstrahlungen der Eisenbahn oder auch die Strafe Gottes für ein zu üppiges Leben seien für die Kartoffelseuche verantwortlich. Erst 1859 gelang durch H. A. de Bary der eindeutige Nachweis, daß bestimmte pilzähnliche Organismen für die Seuche verantwortlich sind. Er veröffentlichte 1861 den Entwicklungszyklus des Erregers, den er *Botrytis infestans* nannte, später wurde der Name in *Phytophtora infestans* geändert.

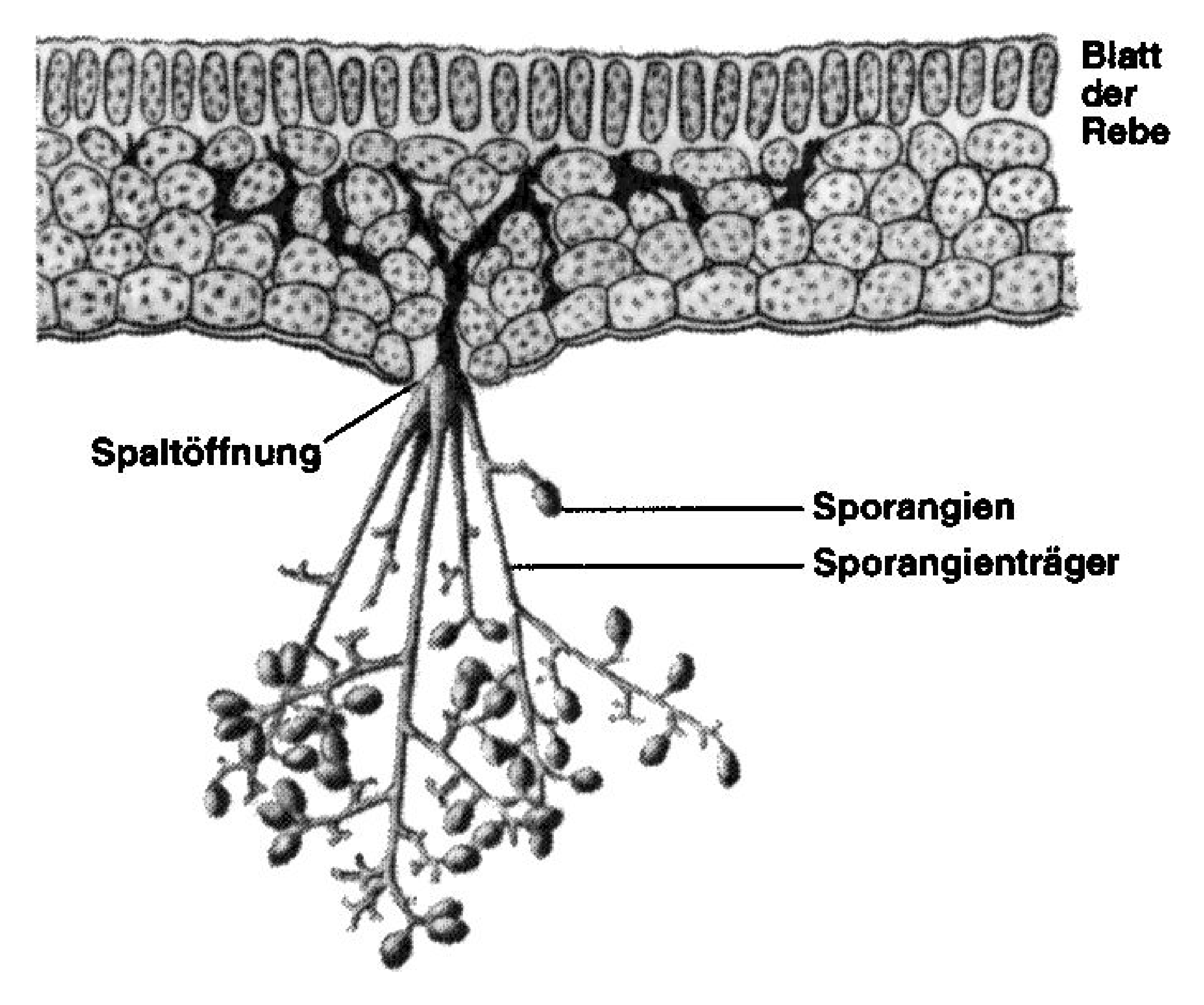
Auch in anderen Gebieten West- und Mitteleuropas brach zu dieser Zeit die Krankheit aus, hatte aber nicht die verheerenden Folgen wie in Irland.

Epidemisch tritt die Kraut- und Knollenfäule besonders im Seeklima und in niederschlagsreichen Gebieten auf. An den Blättern befallener Pflanzen entstehen braune Flecken, die sich bei feuchtem Wetter schnell vergrößern können, so daß die ganze Pflanze geschädigt wird und schließlich abstirbt (= Krautfäule). Auf der Blattunterseite von Pflanzen, die von

Falschen Mehltaupilzen befallen sind, erscheint unter den Flecken ein weißgrauer Belag (= Blattschimmel) aus Konidienträgern (beziehungsweise Zoosporangienträgern).

Anhaltende Nässe fördert die Ausbreitung der Kraut- und Knollenfäule, so daß in kurzer Zeit ganze Bestände absterben, von denen dann ein charakteristischer Geruch ausgeht. Die Erkrankung kann auch auf die Knollen übergehen (= Knollenfäule), wenn bei Regen Sporangien in den Boden geschwemmt werden. Die Infektion erfolgt durch die freigesetzten Zoosporen, die, von den Wurzeln chemotaktisch angelockt, in die Lenticellen eindringen. Meist werden die Knollen bei der Ernte befallen («Nachernte-Fruchtfäule»); es treten bleigraue, leicht eingesunkene Flecken auf, unter denen das Fleisch braun verfärbt ist (= Braunfäule, Trockenfäule). Braunfaule Knollen werden in der Regel sekundär noch von anderen Fäulniserregern befallen (zum Beispiel Arten von *Fusarium*). Der Pilz überwintert als Mycel in Knollen und Ernterückständen. Ursprungsland des Erregers ist Mittel- und Nordamerika, in Europa hat er sich 1842 eingebürgert. Ein neuer Stamm von *Phytophtora infestans* wird seit 1984 in Europa beobachtet; er wurde wahrscheinlich aus Südamerika eingeschleppt. Da dieser Pilz sich mit den bereits vorhandenen Stämmen sexuell vermischen und vererben kann, sind neue Stämme mit anderen Eigenschaften entstanden. Dadurch sind zuvor gegen *Phytophtora* resistente Kartoffelsorten wieder anfällig geworden, und einige Bekämpfungsmittel haben ihre Wirksamkeit verloren. Diese Stämme befallen auch Tomaten, so daß in den letzten Jahren auch bei ihnen ein verstärkter Befall zu beobachten war.

Abbildung 28: Falscher Mehltau (*Plasmopara viticola*) im Gewebe eines Blattes der Weinrebe: aus den Spaltöffnungen der Wirtspflanze wachsen die Sporangienträger mit den Sporen heraus; sie sind so dicht angeordnet, daß sie einen weißgrauen Belag auf dem Wirtsgewebe bilden.



Ein weiterer Falscher Mehltaupilz, *Plasmopara viticola*, befällt Reben (Abbildung 28). Die Krankheit, die auch unter dem Namen *Peronospora*, *Rebenperonospora* oder *Lederbeerenkrankheit* bekannt ist, gelangte erstmals 1865, nach anderen Quellen 1878, mit Pflanzen aus Nordamerika nach Europa.

Bereits 1885 wurde die Bekämpfung des Falschen Mehltaus der Rebe mit Kupferkalkbrühe (Bordeauxbrühe) allgemein eingeführt. Auch heute werden noch kupferhaltige Mittel zur Bekämpfung einer Reihe von Erregern des Falschen Mehltaus eingesetzt. Bei feuchter Witterung ist zur Bekämpfung dieses Parasiten oft jede Woche eine Spritzung mit pilztötenden Mitteln notwendig.

Andere Falsche Mehltaupilze befallen eine Reihe von Gemüsearten wie Gurken, Spinat, Kopfsalat.

Echter Mehltau

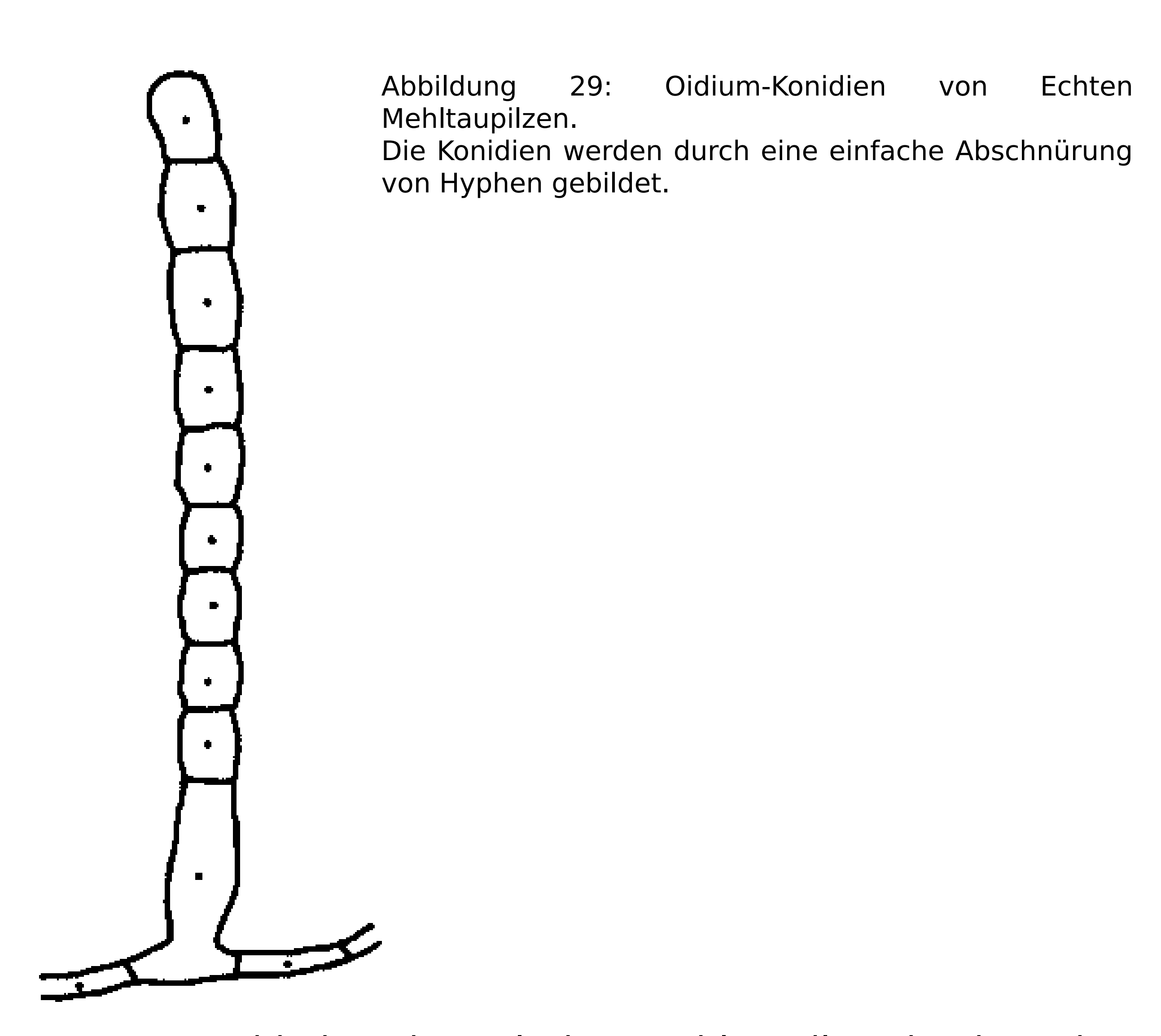


Abbildung 29: Oidium-Konidien von Echten Mehltaupilzen.
Die Konidien werden durch eine einfache Abschnürung von Hyphen gebildet.

Im Unterschied zu den Falschen Mehltaupilzen ist der Echte Mehltau (*Uncinula necator*) ein Schlauchpilz und gehört damit zu den Echten Pilzen. Er wird auch nach der Konidienform als *Oidium tuckeri* oder als *Äscherich* bezeichnet (Abbildung 29). Wie am Namen zu erkennen ist, bildet er auch einen weißlichen Belag an den Blättern, aber meist an der Oberseite oder an frischen Trieben.

Im Mittelalter hielt man den weißen Belag auf den Pflanzen für vom Himmel gefallenen mehligen Tau, der den Pflanzen schadet.

Der Pilz ist in Nordamerika beheimatet und wurde zur gleichen Zeit wie die Kartoffelfäule (1845) in England beobachtet. Von dort verbreitete er sich über ganz Europa.

Sein weißlicher Belag erscheint bei der Rebe auf Blättern und Beeren, die einschrumpfen und verrotten. Im Hausgarten treten die Echten Mehltaupilze oft an Rosen, Apfelbäumen, Stachelbeeren und an der Waldrebe (*Clematis*) auf. Jeder Wanderer hat sicherlich schon am Waldrand den auffälligen, weißlichen Belag an Blättern junger Eichenbäume beobachtet, die vom Echten Mehltau befallen sind.

Im Unterschied zum Falschen Mehltau wird der Echte Mehltau mit schwefelhaltigen Mitteln bekämpft.

Rostkrankheiten

Rostkrankheiten oder Rost sind Pilzkrankheiten, die durch Rostpilze hervorgerufen werden. Sie gehören zu den Ständerpilzen. Zur Zeit sind etwa 5000 Arten bekannt, die auf zahlreichen Kultur- und Wildpflanzen parasitieren. Epidemien haben in früheren Zeiten oft zu Hungersnöten geführt. Der Rost ist schon im Altertum und im Mittelalter als seuchenartige Erkrankung des Getreides erkannt worden. Bereits der Grieche Theophrast (371–287 vor Christus) beschrieb die Krankheitssymptome auf verschiedenen Kulturpflanzen. Ovid (43 vor Christus–17 nach Christus) unterschied bereits zwischen Rost und Mehltau. Die Römer opferten aus Furcht vor dem Getreiderost und zu seiner Abwendung der Gottheit Robigus (Robigo). Schon im Mittelalter fiel den Bauern die starke Verbreitung der Roste in der Nähe von Berberitzen (Sauerdorn) auf, und Gerichte veranlaßten ihre Entfernung aus dem Umkreis von Getreidefeldern. Die Ursache der

Rostkrankheiten blieb lange umstritten, bis die Arbeiten von H. A. de Bary (1863) über die parasitäre Natur der Brand- und Rostpilze eindeutig bewies, daß Rost durch eine Infektion verursacht wird. Der Name Rost bezieht sich auf die Farbe bestimmter Sporenlager (Aecidio- oder Uredosporen, siehe unten). Sie sind meist rostfarbig, punkt-, strich- oder ringförmig und werden an Blättern oder Stengeln gebildet. Die meisten Rostpilze weisen einen komplexen Entwicklungszyklus mit einem Generationswechsel auf, der oft mit einem Wirtswechsel verbunden ist.

Rostpilze besitzen mannigfaltige Entwicklungszyklen; es gibt Formen mit obligatem Wirtswechsel, wobei die einkernige (haploide) und die zweikernige (dikaryotische) Phase eine andere Wirtspflanze benötigen; bei anderen Formen verläuft die gesamte Entwicklung auf einem Wirt; es gibt Arten mit vollständigem Entwicklungszyklus, in dem fünf Sporenformen ausgebildet werden, beispielsweise beim Schwarzrost des Weizens: Die haploiden (einkernigen) Basidiosporen infizieren Berberitzen und bilden ein haploides Mycel; nach der Aufnahme von haploiden Kernen (Spermatien) von einem anderen, konträrgeschlechtlichen Mycel (oder von Sporen) bildet sich an der Unterseite der Berberitzenblätter ein orange gefärbtes Sporenlager aus, in dem dikaryotische Sporen (*Aecidiosporen*) gebildet werden. Mit dem Kernphasenwechsel von haploiden (einkernigen) zu zweikernigen Zellen ändern sich die parasitischen Eigenschaften; es erfolgt ein Wirtswechsel. Die Aecidiosporen keimen nur auf Getreide und Wildgräsern (nicht mehr auf Berberitzen). Von dem interzellulären, dikaryotischen Mycel (= Paarkernmycel) im neuen Wirt werden mehrere Generationen von Sporenlagern entwickelt, die die Epidermis durchbrechen und gelbliche Sommersporen, die *Uredosporen*, bilden. Die Uredosporen vermögen am Getreide neue Infektionen auszulösen, so daß innerhalb weniger Wochen ein ganzes Weizenfeld befallen

sein kann. Gegen Herbst, am reifenden Getreide, entwickelt das gleiche Paarkernmycel in weiteren, fast schwarzen Lagern oder in den Uredolagern die auf Stielen sitzenden Wintersporen, die *Teleutosporen*; es sind braune, dickwandige, gegen Trockenheit und Kälte widerstandsfähige zweizeilige Sporen. In den Zellen verschmelzen die Kernpaare miteinander (Karyogamie). Die Teleutosporen überwintern auf dem Feld (winterliche Ruheperiode), und im Frühjahr keimt jede der diploiden Zellen nach einer Reduktionsteilung (Meiose) zu einer schlauchförmigen Basidie, die vier haploide Basidiosporen bildet, die wieder Berberitzen befallen.

Neben diesem vollständigen Entwicklungszyklus gibt es andere Rostpilz-Arten, die eine oder mehrere Sporenformen unterdrücken. Diese verkürzte Entwicklung tritt besonders häufig in Klimazonen mit kurzer Vegetationsperiode auf. Die Entwicklung kann auch durch Wiederholung einzelner Generationen, häufig der Uredosporen-Entwicklung, verlängert werden. Es gibt sogar imperfekte Rostpilze, von denen nur die asexuell gebildeten Uredosporen bekannt sind. Echte Fruchtkörper werden von den Rostpilzen nicht gebildet.

Wirtschaftlich wichtig sind besonders die «Getreideroste», zum Beispiel der Schwarzrost und Gelbrost des Weizens und anderer Getreidearten. Bei starkem Befall kann es zum Kümmern der befallenen Blätter und sogar zum Absterben der Pflanzen kommen. Eine Bekämpfung wirtswechselnder Rostpilze durch Ausrotten des Zwischenwirts (zum Beispiel Berberitze beim Schwarzrost) hat nur teilweise zum Erfolg geführt, da bei den meisten Arten auch die Uredosporen überwintern können oder die Sporen bereits im Herbst die junge Saat des Wintergetreides oder verschiedene Kulturgräser infizieren. Uredosporen werden außerdem länderweit durch den Wind verbreitet. Die Züchtung resistenter Pflanzensorten bereitet große Schwierigkeiten, da es bei den Rostpilzen eine große Zahl morphologisch

gleich aussehender, aber physiologisch unterschiedlicher Formen gibt. Außerdem entstehen durch Mutation und Neukombination bei Kreuzungen immer wieder neue Rassen, welche die Pflanzenresistenz überwinden.

Zu den wichtigsten Rostkrankheiten gehört auch der Kaffee-Rost (*Hemileia vastatrix*). In Plantagen wurde er erstmals 1869 in der früheren britischen Kolonie Ceylon (heute Sri Lanka) beobachtet. In den folgenden Jahren erfolgte eine epidemieartige Ausbreitung, so daß nicht nur in den Anbaugebieten Ceylons, sondern auch in den gesamten umliegenden Regionen der Anbau von Kaffee zum Erliegen kam. Die Kaffee-Plantagen in Sri Lanka, Java, Sumatra und weiteren Gebieten wurden aufgegeben und an Stelle von Kaffee Tee angebaut. Das führte auch dazu, daß die Trinkgewohnheiten der Briten sich radikal änderten. Ein Volk traditioneller Kaffeetrinker, 1675 gab es in London etwa 3000 Kaffeehäuser, wandelte sich zu Teetrinkern.

Die Gruppe der Rostpilze umfaßt etwa 126 Gattungen mit circa 5000 Arten, die meist streng an ihre Wirtspflanze gebunden sind Die Rostpilze zeigen eine ausgeprägte Spezialisierung; so finden sich viele Varietäten, die sich morphologisch nicht unterscheiden, aber auf unterschiedliche Pflanzenarten spezialisiert sind. Außerdem gibt es zahlreiche physiologische Rassen (*Biotypen*, *Pathotypen*, bei *Puccinia graminis* var. *tritici* mehr als 300), die sich gleichfalls morphologisch gleichen, jedoch nur bestimmte Rassen einer einzelnen Kulturpflanze befallen.

Rostpilze sind stammesgeschichtlich eine sehr alte Pilzgruppe. In Fossilien aus dem Karbon (vor circa 300 Millionen Jahren) konnten Farnparasiten nachgewiesen werden, die eine überraschende Übereinstimmung mit heutigen ursprünglichen (primitiven), an Koniferen lebenden Formen aufweisen. Im Erdmittelalter (Mesozoikum, vor 65–248 Millionen Jahren) gingen die Rostpilze auf Nadelbäume (Nacktsamer = Gymnospermen), besonders Koniferen, und von der Oberkreide (vor 65–95 Millionen Jahren) an auf

Bedecktsamer (= Angiospermen) über; damit entwickelte sich ein Wirtswechsel zwischen Gymno- und Angiospermen.

Brandkrankheiten

Die Brandpilze sind Ständerpilze und gehören gleichfalls zu den wichtigsten Erregern von Pflanzenkrankheiten. Es sind etwa 900 Arten bekannt, die auf etwa 4000 verschiedenen Pflanzen parasitieren können. Der Name bezieht sich auf die durch den Pilz gebildeten brandartigen, schwarzbraunen Sporenmassen in bestimmten Pflanzenteilen, beispielsweise an Blättern, Stengeln und oft an Blüten, Ähren sowie Rispen.

Brandpilze bilden zwei Myceltypen aus: ein saprophytisches, haploides, meist hefeartiges Sproßmycel, das auf künstlichen Nährböden gezüchtet werden kann, und ein zweikerniges (dikaryotisches), obligat parasitisches Mycel, das streng an bestimmte Wirtspflanzen gebunden ist. Fruchtkörper oder besondere Geschlechtsorgane werden nicht ausgebildet.

Besonders auffällig ist das Brandlager des *Maisbeulenbrands* (*Ustilago maydis*) an verschiedenen Teilen der Maispflanze. Am häufigsten entwickelt es sich an den Blütenständen in Form großer, auffälliger braunschwarzer Deformationen.

Die Ernteausfälle durch Brandkrankheiten des Getreides waren zeitweise so groß, daß die ganze Ernte vernichtet wurde.

Die Bedeutung der Brand- und Rostkrankheiten läßt sich auch in der Bibel nachlesen: beispielsweise in der Strafrede des Propheten Amos an die Frauen in Samaria, in der er ihnen wegen ihres ausschweifenden, gottlosen Lebens mit «dürren Zeiten und Brandkorn» droht (Amos 4, 1–9, Luther-Übersetzung).

Im Mittelalter wurden die Sporenlager und Sporen von *Ustilago avenae* (Haferflugbrand) und anderen Bränden häufig erwähnt, doch nicht als Pilze angesehen. Von O. von

Münchhausen (1765) wurden sie sogar als Insekteneier gedeutet.

Weitere wichtige Brandkrankheiten sind der Weizensteinbrand (*Tilletia caries*), auch Stinkbrand genannt, da durch seine Ausscheidung von Histamin das Mehl einen unangenehmen Fischgeruch erhält, der Zwergsteinbrand (*Tilletia controversa*), der Flugbrand des Weizens und der Gerste (*Ustilago nuda*), durch den auch heute noch vereinzelt hohe Ernteausfälle zu beklagen sind.

Auch im 20. Jahrhundert traten verheerende Epidemien an wichtigen Nahrungspflanzen auf. So wurde zwischen 1942 und 1943 die bengalische Reisernte weitgehend durch den Pilz *Bipolaris oryzae* vernichtet; als Folge sollen über zwei Millionen Menschen verhungert sein. 1946 ging ein großer Teil der Weizenernte in den USA verloren. Ein etwa 15-%iger Ernteausfall durch Befall der Maispflanzen mit dem Maisbrand-Erreger *Helminthosporium maydis* war 1970 im Süden der USA zu beklagen; der Schaden betrug etwa eine Milliarde US-Dollar.

Da viele pflanzenpathogene Pilze wichtige Nutzpflanzen großflächig und schnell schädigen, könnten sie neben Viren, Bakterien und deren Toxine als Biowaffen eingesetzt werden. Seit etlichen Jahrzehnten, besonders aber während des Zweiten Weltkriegs, liefen in vielen Ländern Programme zur Entwicklung von bestimmten Schadpilzen, die zur Vernichtung von wichtigen Nahrungspflanzen geeignet schienen. Auch wenn Menschen durch die Pilze, im Gegensatz zu den bakteriellen Krankheitserregern, nicht direkt betroffen werden, so kann doch eine Vernichtung von Grundnahrungsmitteln verheerende wirtschaftliche Folgen haben und so eine Schwächung des Feindes bewirken. Getestet wurden beispielsweise *Puccinia graminis*, der Erreger des Weizenschwarzrosts zur Infektion von Weizenpflanzen, der Blattbrand-Erreger *Pyricularia oryzae* gegen Reispflanzen und der Kartoffelfäule-Erreger *Phytophtora infestans* gegen Kartoffelstauden.

Vor einigen Jahren (1999) verabschiedete der US-Kongreß ein Programm und bewilligte 23 Millionen US-Dollar zur Erforschung und Entwicklung von «Pilzherbiziden» (Mycoherbiziden), die zur Vernichtung von illegalen Drogenpflanzen genutzt werden könnten. Gegen den Koka-Strauch hat sich ein Stamm von *Fusarium oxysporum* aus Hawaii als sehr wirkungsvoll erwiesen. Der Schlafmohn läßt sich mit einem Stamm von *Pleospora papaveracea* bekämpfen. Dieser Pilz wurde bereits in der früheren Sowjetunion entdeckt und zur Vernichtung der Mohnfelder weiterentwickelt.

Es liegen bereits einsatzbereite Systeme zur Vernichtung verschiedener Kulturpflanzen mit bestimmten, angepaßten pilzlichen Krankheitserregern vor. Inwieweit sie schon genutzt wurden, ist nicht bekannt. Es ist aber anzunehmen, daß die Entwicklung von noch aggressiveren, auch gentechnisch veränderten Pilzstämmen fortgesetzt wird.

12. Abstammung und taxonomische Einordnung der Pilze

In der Antike und den folgenden Jahrhunderten wurden Lebewesen in zwei Reiche eingeordnet, das der beweglichen Tiere und das der unbeweglichen Pflanzen. Pilze hielt man auch für «entartete» Pflanzen, so wurden zum Beispiel Trüffel für unterirdische Pflanzenformen und andere Pilze als Auswüchse von Baumwurzeln angesehen.

Nach Erfindung des Mikroskops und den folgenden intensiven Untersuchungen der Feinstruktur verschiedener Organismen Mitte des 17. Jahrhunderts begann man jedoch an der Verwandtschaft der Pilze mit den Pflanzen zu zweifeln. Die zytologischen Untersuchungen ergaben, daß die Zellen und die höheren Strukturen der Pilze sich wesentlich von denen der Pflanzen unterscheiden. Der französische Gelehrte P. R. Villemet hielt die Unterschiede zwischen den beiden Organismengruppen für so schwerwiegend, daß er Pilzen ein eigenes Reich zubilligte (1784); er nannte es «Pseudo-zoo-litho-phyta», da nach seiner Meinung Pilze Eigenschaften der übrigen Reiche (Mineral-, Pflanzen- und Tierreich) enthalten.

Diese Ansicht konnte sich aber nicht durchsetzen; die Einordnung der Pilze bei den grünen Pflanzen blieb jedoch weiter umstritten.

Im 19. Jahrhundert führten J. Hogg und Ernst Haeckel (1866) das Sammelreich der Protisten (Protista, Protoctista, Protobionta) ein, da man glaubte, daß niedere Organismen, einschließlich der Pilze, an der Basis der Entwicklung von Pflanzen und Tieren stehen. In dieses neue Reich wurden alle Lebewesen gestellt, die nicht eindeutig in das Tier- oder Pflanzenreich paßten: neben den Pilzen faßte man bei den Protisten so unterschiedliche Organismen wie Bakterien, Algen und Einzeller (Protozoen) zusammen. Doch war man

sich schon damals bewußt, daß nicht alle dieser verschiedenen Organismengruppen miteinander verwandt sind und daß das Reich der Protisten somit nicht als natürliche Abstammungslinie anzusehen ist.

Aufgrund der ähnlichen Lebensweise der meisten Bakterien und der Pilze bestand somit bis in das 20. Jahrhundert das Problem, diese beiden Organismengruppen voneinander zu unterscheiden. Bakterien wurden daher anfangs auch als primitive Pilze betrachtet, was auch in der früheren Bezeichnung «Schizomyces» (= Spaltpilze) zu erkennen ist. Durch weitere Fortschritte in der mikroskopischen Technik wurden immer größere Unterschiede in der Zellorganisation von Bakterien und Pilzen erkannt. Besonders schwerwiegend war der Nachweis, daß Pilze, wie Pflanzen und Tiere, einen Zellkern besitzen, der von einer Membran umgeben ist (=Eukaryoten). Bei den Bakterien fehlt dagegen diese Membran (=Prokaryoten). Damit war ein grundlegender Unterschied zwischen Pilzen und Bakterien gefunden.

Bakterien wurden aber immer noch als die am tiefsten stehenden Glieder des Pflanzenreiches angesehen. Im Lehrbuch «Die Pflanzenwelt» von Otto Warburg (1913) wird beispielsweise neben dem Namen Bakterien auch noch der Name Spaltpilze (Schizomycetes) verwendet, und ihre Einordnung erfolgt bei den Urpflanzen (Protophyta) zusammen mit den Spaltalgen (Schizophyceae, Cyanobakterien) in der Abteilung Spaltpflanzen (Schizophyta). Die Pilze als Pilzpflanzen (Mycetophyta) ordnete man dagegen zusammen mit den Algenpflanzen (Phycophyta) in der Gruppe Lagerpflanzen (Thallophyta) ein.

Erst 1938 wurden die Bakterien auf Vorschlag von Herbert F. Copeland aus dem Protistenreich herausgenommen und in ein eigenes Reich, das der *Monera*, eingeordnet. Aber erst elf Jahre später billigte man, auf Vorschlag von R. H. Whittaker (1969), auch den Pilzen ein eigenes Reich («Mycetae») zu. Es gab somit neben dem Reich Monera

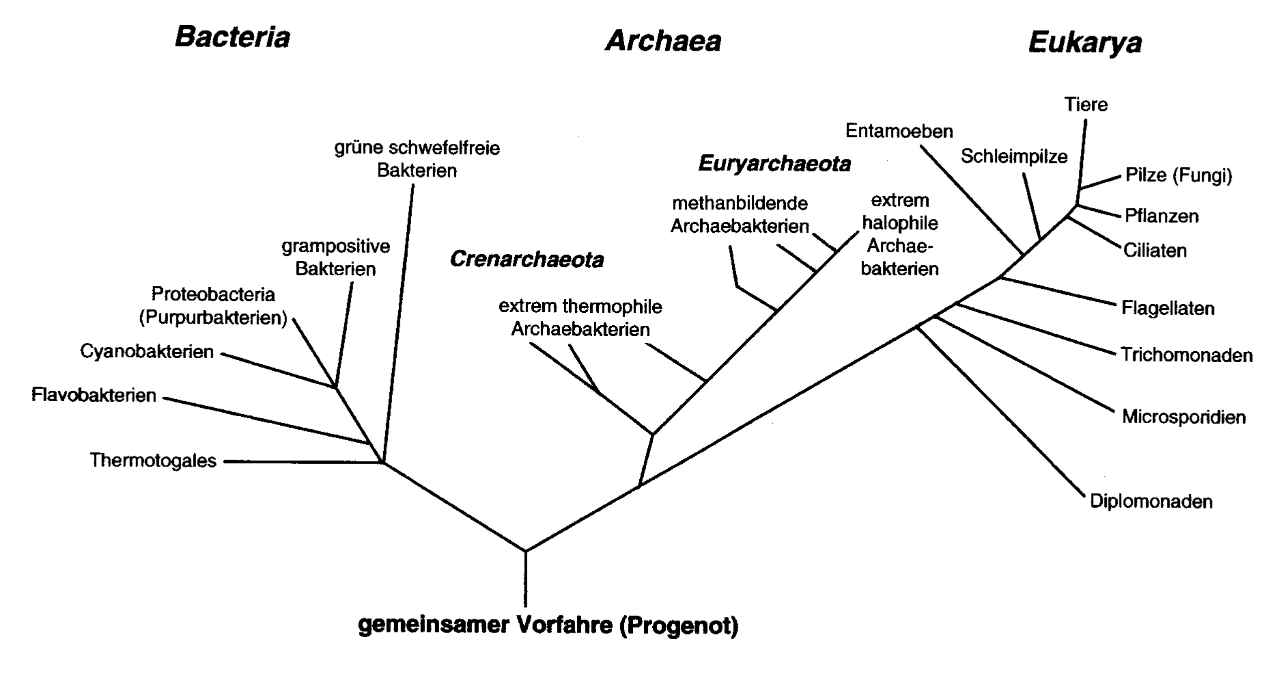
(Bakterien, Spaltpilze), in dem die Lebewesen ohne echten Zellkern eingeordnet wurden, vier weitere Reiche für die Organismen mit einem echten Zellkern: das Reich der Tiere (Animalia), der Pflanzen (Plantae), der Pilze (Mycota, Fungi) und das Sammelreich Protista (Protoctista), in das die meisten Algen und Protozoen eingeordnet wurden.

Auch nach der Einführung des Pilzreiches wurde zwischen den Schleimpilzen, die bewegliche Plasmamassen bilden, den «Niederen Pilzen», die durch Geißeln bewegliche Stadien ausbilden, und den «Echten Pilzen» unterschieden. Einen überragenden Fortschritt bei der Aufstellung natürlicher Stammbäume brachte in den letzten Jahren die Anwendung neuer molekulargenetischer Methoden, in denen die Zusammensetzung von bestimmten Makromolekülen der Zellen bestimmt wird.

Besonders geeignet für diesen genetischen Stammbaum sind die Ribosomen, die Eiweißfabriken der Zellen. Sie kommen in allen Organismen vor, sind leicht zu isolieren, und, was besonders wichtig ist, sie enthalten Abschnitte, die während der Evolution stabil (konserviert) geblieben sind, sowie Abschnitte, die durch Mutationen stärker verändert werden.

Die Einordnung der Schleimpilze und der früher bei den Niederen Pilzen eingeordneten beweglichen Formen ist zum Teil noch umstritten. Sie weisen aber, bis auf die Flagellatenpilze (Chytridiomycetes), keine nähere Verwandtschaft zu den Echten Pilzen auf.

Abbildung 30: Phylogenetischer Stammbaum der Lebewesen. Die Organismen werden in drei Domänen eingeordnet: Bacteria (Echte Bakterien), Archaea (Archaebakterien) und die Eukarya (Eukaryoten). Die Einteilung erfolgt nach der Sequenzanalyse (Anordnung der Bausteine) von der Ribonucleinsäure bestimmter Ribosomen (16S- beziehungsweise 18S-rRNS).



In diesen molekular-phylogenetischen Systemen werden daher die Pilze und die pilzähnlichen Protisten aus dem Pflanzenreich, dem sie aus historischen Gründen noch bis vor wenigen Jahren zugeordnet wurden, ausgegliedert und in unterschiedliche Abstammungsgemeinschaften gestellt (Abbildung 30).

In neueren phylogenetischen Systemen werden die Schleimpilze (vorläufig) zwei Abstammungslinien zugeordnet: die früheren Zellulären Schleimpilze (Acrasiomycetes) den Acrasea (Heterolobosa), die Echten Schleimpilze und Dictyostelidae (Dictyostela, Dictyostelium) der Abstammungslinie Mycetozoa. Die Netzschleimpilze (Labyrinthulomycota, Labyrinthulida), die Hyphochytriomycetes (Hyphochytriomycota) und die Eipilze (Oomycetes, Oomycota) werden dagegen mit anderen Protisten (zum Beispiel den Kieselalgen [Diatomeae], Chrysophyceae, Braunalgen [Phaeophyceae]) in eine weitere Abstammungslinie, bei den Stramenopiles (beziehungsweise Heterokontae), eingeordnet. Nach den Daten aus den molekulargenetischen, biochemischen und morphologischen Untersuchungen konnte bestätigt werden, daß die «Höheren Pilze», die Schlauch- und Ständerpilze

sowie die zugehörigen Fungi imperfekti, und die Jochpilze, die keine beweglichen Stadien mehr ausbilden, nahe miteinander verwandt sind. Am Anfang dieser Abstammungslinie sind aber auch noch die beweglichen Flagellatenpilze (Chytridiomyceten) einzuordnen; die verwandtschaftliche Beziehung der Flagellatenpilze zu den Echten Pilzen waren auf Grund klassischer, nicht genetischer Merkmale schon lange vorher vermutet worden. Dieser Abstammungsgemeinschaft wird der Rang eines Reiches zugebilligt, das international meist als Fungi (Pilze im engeren Sinne) oder als Mycobionta (Abteilung Echte Pilze) bezeichnet wird. Die Fungi haben sich im Laufe der Evolution aus wasserbewohnenden, pilzähnlichen Protisten entwickelt. Direkte Vorfahren sind wahrscheinlich Chytridiomyceten-ähnliche Pilze. Nach den molekulargenetischen Untersuchungen stehen darüber hinaus die Echten Pilze den Tieren näher als den Pflanzen. Die systematische Gliederung und Ordnung der Pilze ist aber immer noch Gegenstand intensiver Forschung und wird in vielen Bereichen intensiv diskutiert.

In der medizinischen Praxis werden die humanpathogenen Pilze üblicherweise nach ihrem Wachstum in drei Gruppen unterteilt: Dermatophyten (Hautpilze), Hefen sowie Schimmel- und sonstige Pilze (D-H-S-Schema). – Pilze werden nach den internationalen Nomenklaturregeln der Botanik mit einem Gattungsnamen und einem *Epitheton* gekennzeichnet. So heißt der Steinpilz *Boletus edulis*, wobei *Boletus* der Gattungsname und *edulis* das Epitheton ist. In der wissenschaftlichen Literatur wird dem Namen noch der Name des Autors oder der Autoren hinzugefügt, die den Pilz benannt haben.

Phylogenetische Studien lassen vermuten, daß Pilze bereits vor mehr als 600 Millionen Jahren das Festland besiedelten. Die ersten Pilze sollen sich bereits vor 800 Millionen Jahren oder sogar schon früher entwickelt haben.

Eindeutige Pilzformen (*Chytridiomyceten*-ähnlich) lassen sich bereits im späten Präkambrium (vor mehr als 500 Millionen Jahren) in Schalen von Meerestieren nachweisen. Endosymbiontische Mykorrhizen wurden bereits im Ordovizium (frühes Paläozoikum) vor circa 460 Millionen Jahren ausgebildet (Endogonales, Glomales). Eine Vielzahl von Pilzformen, die heutigen Pilzgruppen zugeordnet werden können, sind in einem verkieselten Torfgebiet aus dem Devon (vor circa 400 Millionen Jahren) in Rhynie (Schottland) nachgewiesen worden. Es wurden nicht nur unseptierte Hyphen von pilzähnlichen Protisten, sondern auch alle Stadien der Entwicklung von Schlauchpilzen (Ascomycota) und Chytridiomyceten-Formen gefunden. Es konnten auch endosymbiontische Jochpilze (*Glomus*-ähnlich) und eine Flechtensymbiose mit Cyanobakterien (= *Winfrenatia reticulata*) nachgewiesen werden. Rostpilz-ähnliche Formen sind auf Farnen aus dem Karbon (circa 300 Millionen Jahre alt) gefunden worden, und im «Steinkohlewald» traten bereits Schnallenstrukturen an Mycelien auf, die denen vieler heutiger Ständerpilze entsprechen. Fruchtkörper von Ständerpilzen, die den Schwindlingen (*Marasmius*-Arten) sehr stark ähneln, haben sich im circa 90 Millionen Jahre alten Bernstein erhalten.

Glossar

Aerob:
Bedingungen, bei denen molekularer Sauerstoff (O_2) vorliegt

Agaricales:
Ordnung der Blätterpilze

Anamorph:
asexuelles Stadium (= Konidienstadium) von Pilzen

Anaerob:
sauerstofffreie Bedingungen

Aphyllophorales:
die Nichtblätterpilze

Ascomyceten:
die Schlauchpilze

Basidie:
sporentragende Zelle (Sporangium), in der die Reduktionsteilung stattfindet; es entstehen meist 4 Sporen

Biotop:
bestimmter Lebensraum mit charakteristischen Umweltverhältnissen

chemoheterotroph:
Eigenschaft eines Organismus, dem organische Stoffe sowohl als Energie- als auch als Kohlenstoffquelle dienen

Chromosom:
fadenförmiges, langes DNS-Molekül im Zellkern mit den Erbeinheiten (Gene), die die Information zur Synthese der Proteine von Organismen enthält

Dikariophase:
Zweikernphase (Paarkernphase), vegetative Phase von Ständerpilzen oder Hyphen der Schlauchpilze vor der

Ausbildung der Sporangien, in der die Zellen zwei (haploide) Kerne enthalten.

Dimorphismus:
Wachstum eines Pilzes in zwei verschiedenen Formen, zum Beispiel hefeartig und fädig

Diploid:
Kern mit doppeltem Chromosomensatz nach Verschmelzen von haploiden (geschlechtlich unterschiedlichen) Kernen

DNS (DNA):
Abkürzung für Desoxyribonucleinsäure; Makromoleküle, die Träger des Erbmaterials (Gene) sind

Eukaryoten:
Organismen mit einem echten, von einer Membran umgebenen Zellkern; im Gegensatz dazu haben die *Prokaryoten* (Bakterien, Archaebakterien) keine Membran um ihre Kernäquivalente (nach E. Chatton (1937)

Fruchtschicht:
das Hymenium; bei vielen Schlauch- und Ständerpilzen die Zellschicht, an der die Asci beziehungsweise Basidien gebildet werden, die die Pilzsporen erzeugen

Fruchtkörper:
verdichtetes Mycel, unterschiedlichster Form, in oder auf dem die Sporen gebildet werden

Gastromyceten:
Bauchpilze, Gruppe von Ständerpilzen, bei denen sich die Sporen im Innern der Fruchtkörper entwickeln

Gleba:
sporenbildender Bereich im Inneren von Bauchpilzen

Habitat:
der Ort in der Natur, wo ein Organismus lebt

Haploid:
einkernige Zellen mit einfachem Chromosomensatz

Hymenium:
siehe *Fruchtschicht*

Hyphen:

schlauchartige Zellen mit oder ohne Querwände, aus denen Pilze aufgebaut sind

Konidien:

ungeschlechtliche Sporen, die nicht nach geschlechtlicher Kernverschmelzung, sondern rein vegetativ durch Abschnürung, Aussprossung oder Zerfall von Hyphenzellen entstehen; meist in sehr hoher Anzahl gebildet

Meiose:

Reduktionsteilung, Halbierung des doppelten Chromosomensatzes auf die einfache (haploide) Chromosomenzahl während der geschlechtlichen Sporenbildung

Mycel:

die Gesamtheit der Hyphen eines Pilzes in der vegetativen Phase

Mykorrhiza:

Wurzelsymbiose von Pilzen mit höheren Pflanzen

Ökologie:

Umweltbedingungen und Lebensansprüche

Parasiten:

Organismen, die sich von anderen lebenden Organismen ernähren

Pathogenität:

die Fähigkeit eines Mikroorganismus, eine Krankheit hervorzurufen

photoautotroph:

Eigenschaft eines Organismus, Licht als Energiequelle und Kohlendioxid (CO_2) als einzige Kohlenstoffquelle zum Aufbau von organischem Zellmaterial zu nutzen

Photosynthese:

in der Biologie die Nutzung von Lichtenergie, um mit Kohlendioxid (CO_2) und anderen anorganischen Stoffen Zellmaterial aufzubauen

Prokaryoten:

siehe *Eukaryoten*

Rhizoiden:

Hyphenstränge oder Hyphenbündel, die ein wurzelähnliches Aussehen haben

Ribosomen:

kugelige Makromolekülkomplexe im Cytoplasma und in einigen Zellorganeilen; sie bestehen aus Protein und RNS (RNA) und sind der Ort der Eiweißsynthese

RNS (RNA):

Abkürzung für Ribonucleinsäure; langgestreckte Moleküle, die in der Zelle hauptsächlich die Funktion haben, die in der DNS gespeicherte genetische Information umzusetzen; so liest die Messenger-RNS (mRNS, Boten-RNS) die Gene direkt an der DNS ab und überträgt die Information für Eiweißsynthesen auf die Ribosomen, in denen die ribosomale RNS (rRNS, rRNA) an der Eiweißsynthese beteiligt ist

Saprophyten, Saprobier:

Organismen, die totes organisches Material besiedeln und sich davon ernähren

Sporen:

sexuelle Sporen, geschlechtlich gebildete Verbreitungsorgane, die durch Kernverschmelzung und anschließender Reduktionsteilung in Sporangien entstehen

Sprossung:

Vermehrung von Hefen und einigen anderen Pilzgruppen durch Bildung von Tochterzellen

Virulenz:

Infektionsstärke und Maß für die krankmachende Eigenschaft eines Mikroorganismus

Zellwand:

äußere (feste) Hüllschicht von Zellen

Ergänzende und weiterführende Literatur

Populärwissenschaftliche Bücher

Dixon, B.: Der Pilz, der John F. Kennedy zum Präsidenten machte, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1994.

Dörfelt, H., Görner, H.: Die Welt der Pilze, Urania-Verlag, Leipzig, 1989.

Kothe, H., Kothe, E.: Pilzgeschichten, Springer, Berlin, 1996.

Wissenschaftliche Lehrbücher

Dörfelt, H.: Wörterbuch der Mykologie, Spektrum, Akademischer Verlag, 2001.

Esser, K: Kryptogamen, Band I, Springer, Berlin, 2000.

Müller, E., Löffler, W.: Mykologie, Grundriß für Naturwissenschaftler und Mediziner, Thieme-Verlag, Stuttgart, 1992.

Schwantes, H. O.: Biologie der Pilze, Ulmer, Stuttgart, 1996.

Weber, H.: Allgemeine Mykologie, Gustav-Fischer-Verlag, Jena, 1993.

Webster, J.: Pilze. Eine Einführung, Springer, Berlin, 1983.

Bestimmungsbücher und Bildbände

Breitenbach, J., Kränzlin, F.: Pilze der Schweiz, Band I–V, Verlag Mykologia, Luzern, 1984–2000.

Bon, M: Pareys Buch der Pilze, Paul Parey Verlag, Berlin, 1988.

Dähnke, R. M.: 1200 Pilze, Bechtermünz Verlag, Augsburg, 2001.

Flück, M.: Welcher Pilz ist das? Kosmos-Gesellschaft der Naturfreunde, Franckh'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart,

2002.
Gerhardt, E.: Der große BLV Pilzführer für unterwegs, BLV Verlagsgesellschaft, 1997.
Keizer, G. J.: Pilze-Enzyklopädie, Karl-Müller-Verlag, Erlangen, 1988.
Krieglsteiner, G. J., Gminder, A.: Die Großpilze Baden-Württembergs, Band I–IV, Eugen Ulmer, 2000–2003.
Laessoe, T., DelConte, A.: Der neue BLV-Pilzatlas. Speisepilze sammeln und zubereiten. Giftpilze sicher erkennen. BLV Verlagsgesellschaft, München, 1997.
Laux, H. E.: Der große Kosmos-Pilzführer. Alle Speisepilze mit ihren giftigen Doppelgängern. Kosmos-Gesellschaft der Naturfreunde, Franckh'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 2001.
Laux, H. E.: Der neue Pilzatlas, Kosmos (Franckh-Kosmos), 2002.
Lohmeyer, T. R.: Faszination Pilze. Blick in eine rätselhafte Welt. BLV Verlagsgesellschaft, München, 2001.
Michael, E., Hennig, B., Kreisel, H.: Handbuch für Pilzfreunde, Band I–VI, G. Fischer, Stuttgart, 1983–1988.
Winkler, R: 2000 Pilze, einfach bestimmen, AT-Verlag, Aarau, 1996.

Internet

www.pilzepilze.de (dort Links zu vielen Pilzseiten)

Bücher über Teilaspekte der Mykologie

Heinrich, C.: Die Magie der Pilze, E. Dietrichs Verlag, München, 1998.
Pütz, J., Lelley, J. I.: Lebenselixier Pilze (Hobbythek), Egmont vgs Verlagsg., Köln, 2001.
Reiß, J.: Schimmelpilze. Lebensweise, Nutzen, Schaden, Bekämpfung, Springer, Berlin, 1997.

Roth, L., Daunderer, M., Kormann, K.: Giftpflanzen – Pflanzengifte/Allergische und phototoxische Reaktionen, ecomed, Landsberg am L., 1987.
Roth, L., Frank, H., Kormann, K.: Giftpilze, Pilzgifte, Schimmelpilze, Mykotoxine; Vorkommen, Inhaltsstoffe, Pilzallergien, ecomed, Landsberg am L., 1990.
Schultes, R. E., Hofmann, A., Rätsch, C.: Pflanzen der Götter, AT Verlag, Aarau, 1998.
Seebacher, C., Blaschke-Hellmessen, R.: Mykosen – Epidemiologie – Diagnostik – Therapie, Fischer-Verlag, Jena, 1990.
Wegmann, T.: Medizinische Mykologie – ein praktischer Leitfaden, Editiones Roche, Basel, 1988.

Kontakte

über: georg.schoen@biologie.uni-freiburg.de

Abbildungsnachweis

Abbildung 1, 4, 5, 7, 8, 13, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 27, 29: RS-Bildarchiv, Waldkirch

Abbildung 2: Lebende Mikrowelt, Editiones Roches, Basel 1991.

Abbildung 3, 6, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 20, 26, 28: Georg Schön: Mikrobiologie, Studio visuell, Herder Verlag, Freiburg im Breisgau 1978.

Abbildung 25: W. Bulloch: The History of Bacteriology, Oxford University Press, Oxford 1960.

Abbildung 30: RS-Bildarchiv, Waldkirch (stark vereinfacht nach Carl R. Woese)

Impressum

Originalausgabe
Verlag C. H. Beck
C. H. Beck Wissen
in der Beck'schen Reihe
Mit 30 Abbildungen und 4 Tabellen
Originalausgabe

Gesamtherstellung: Druckerei C. H. Beck, Nördlingen
Umschlagentwurf: Uwe Göbel, München
Printed in Germany
ISBN 3-406-50860-X
978-3-406-50860-8
€ 7,90 [D]
www.beck.de